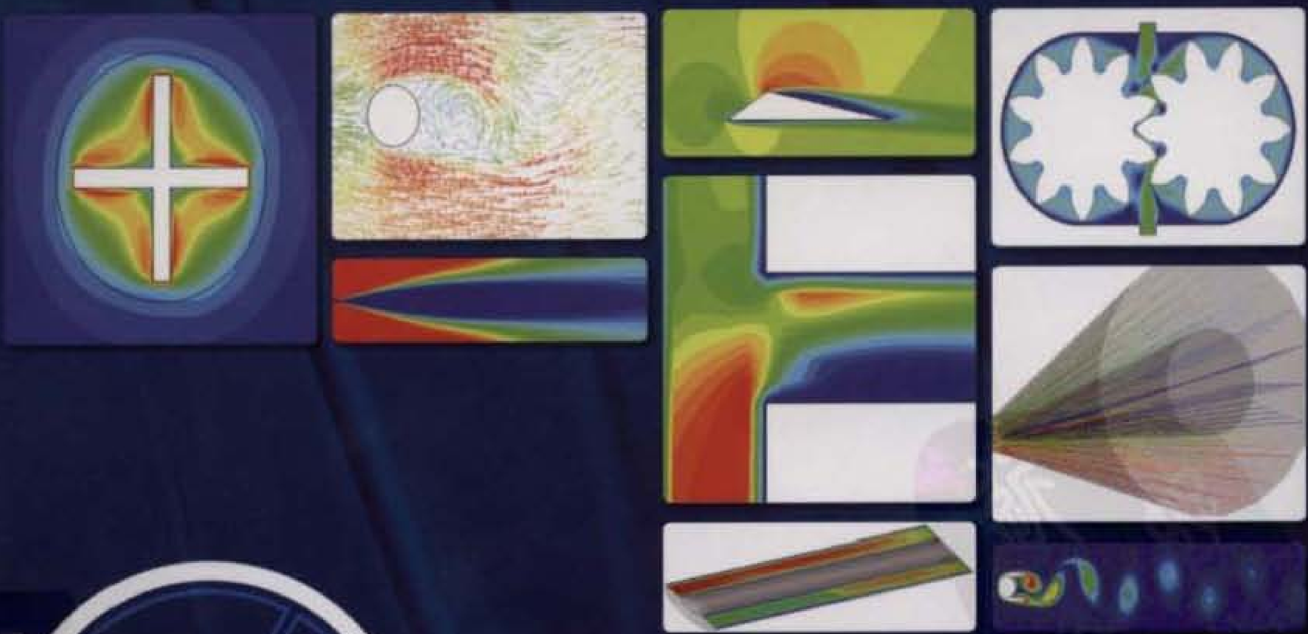
知名专家 赵振兴、郭建春、敬加强、黄坤、陈小榆

倾力推荐

FLUENT

流体分析及仿真实用教程

■朱红钧 林元华 谢龙汉 编著



附 DVD 教学光盘

人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

VISIT…

LANZAROTE

Caliente.com

FLUENT

流体分析及仿真实用教程

■ 朱红钧　林元华　谢龙汉　编著

TB126-39
Z842

人民邮电出版社
北京

图书在版编目（CIP）数据

FLUENT流体分析及仿真实用教程 / 朱红钧，林元华，谢龙汉编著．— 北京：人民邮电出版社，2010.4
ISBN 978-7-115-22526-9

Ⅰ．①F… Ⅱ．①朱… ②林… ③谢… Ⅲ．①流体力学：工程力学－计算机仿真－应用软件，Fluent－教材
Ⅳ．①TB126-39

中国版本图书馆CIP数据核字（2010）第040571号

内容提要

FLUENT 是 CFD 软件中相对成熟和运用最为广泛的商业软件。本书以 FLUENT 6.3.26 版本为蓝本，由浅入深、循序渐进地介绍了利用 FLUENT 进行流体分析与仿真的各部分知识，包括前处理网格生成、湍流模型、传热分析、非定常流动问题、多相流模型、转动模型、组分输运与化学反应模型、流动分析后处理、UDF 使用及编写等。全书通过基础知识和实例介绍相结合的方式讲解了从数值建模到计算后处理各部分操作的基本方法和步骤，最后以综合实例的方式进一步向读者介绍了典型工程问题的流体分析及仿真方法。

本书可作为水利、土木、石工、储运、航空、能源、环境、机械、建筑、海工、材料、动力、冶金等专业的研究生和本科生的计算流体力学教材，同时也可作为 CFD 相关领域专业技术人员的参考用书。

FLUENT 流体分析及仿真实用教程

◆ 编　　著　朱红钧　林元华　谢龙汉
　责任编辑　李永涛
◆ 人民邮电出版社出版发行　　北京市崇文区夕照寺街 14 号
　邮编　100061　　电子函件　315@ptpress.com.cn
　网址　http://www.ptpress.com.cn
　中国铁道出版社印刷厂印刷
◆ 开本：787×1092　1/16
　印张：25
　字数：610 千字　　　　2010 年 4 月第 1 版
　印数：1 – 3 500 册　　　2010 年 4 月北京第 1 次印刷

ISBN 978-7-115-22526-9

定价：58.00 元（附光盘）

读者服务热线：(010)67132692　印装质量热线：(010)67129223
反盗版热线：(010)67171154

拓技工作室
Toptech Studio

拓技工作室

主编： 谢龙汉

编委： 林　伟　魏艳光　林木议　郑　晓　吴　苗

林树财　林伟洁　王悦阳　辛　栋　刘艳龙

伍凤仪　张　磊　刘平安　鲁　力　张桂东

邓　奕　马双宝　王　杰　刘江涛　陈仁越

邓小玲　刘庆国　戴晓霞　应　鹏　赵新宇

莫　衍　朱小远　彭　勇　潘晓烨　耿　煜

刘新东　尚　涛　张炯明　李　翔　朱红钧

邱　婉　唐培培　刘文超　刘新让　林元华

序

CFD 是进行传热、传质、动量传递及燃烧、多相流和化学反应研究的核心和重要技术，广泛应用于航天设计、汽车设计、生物医学工业、化工处理工业、涡轮机设计、半导体设计、HAVC&R 等诸多工程领域。

流体分析的理论方法和实验方法存在较大的局限，发展得相当缓慢，而随着计算机技术的高速发展，CFD 技术开始作为主要的流体分析方法，并在我国得到了飞速的发展。CFD 方法具有成本低和能模拟较复杂或较理想过程等优点。经过一定考核的 CFD 软件可以拓宽实验研究的范围，减少成本昂贵的实验工作量。在给定的参数下用计算机对现象进行一次数值模拟相当于进行一次数值实验，历史上也曾有过首先由 CFD 数值模拟发现新现象而后由实验予以证实的例子。CFD 软件一般都能推出多种优化的物理模型，如定常和非定常流动、层流、紊流、不可压缩和可压缩流动、传热、化学反应等。对每一种物理问题的流动特点，都有适合它的数值解法，用户可对显式或隐式差分格式进行选择，以期在计算速度、稳定性和精度等方面达到最佳。CFD 软件之间可以方便地进行数值交换，并采用统一的前、后处理工具，这就省却了科研工作者在计算机数据衔接方法、编程、前后处理等方面投入的重复、低效的劳动，而可以将主要精力和智慧用于物理问题本身的探索上。

自从 1981 年英国 CHAM 公司首先推出求解流动与传热问题的商业软件 PHOENICS 以来，迅速在国际软件产业中形成了通称为 CFD 软件的产业市场。到今天，全世界至少已有 50 余种这样的流动与传热问题的商业软件，在促进 CFD 技术应用于工业实际中起了很大的作用。在 CFD 软件中，FLUENT 软件是目前国内外使用最多、最流行的商业软件之一。FLUENT 的软件设计基于“CFD 计算机软件群的概念”，针对每一种流动的物理问题的特点，采用适合于它的数值解法在计算速度、稳定性和精度等各方面达到最佳。

FLUENT 软件包含有结构化及非结构化网格两个版本。在结构化网格版本中有适体坐标的前处理软件，同时也可以纳入 I-DEAS、PATRAN、ANSYS 和 ICEMCFD 等著名生成网格的软件所产生的网格。速度与压力耦合采用同位网格上的 SIMPLEC 算法。对流项差分格式纳入了一阶迎风、中心差分及 QUICK 等格式。FLUENT 软件可用来模拟从不可压缩到高度可压缩范围内的复杂流动。由于采用了多种求解方法和多重网格加速收敛技术，因而 FLUENT 能达到最佳的收敛速度和求解精度。灵活的非结构化网格和基于解的自适应网格技术及成熟的物理模型，使 FLUENT 在转捩与湍流、传热与相变、化学反应与燃烧、多相流、旋转机械、动/变形网格、噪声、材料加工、燃料电池等方面有广泛应用。

本书作者从理论、工程实例分析、模型设置、计算方法等各个方面系统阐述了 FLUENT 在流体分析及仿真领域的运用，书中 12 章依次介绍了计算流体力学理论、流体流动分析概述、前处理网格生成、湍流模型、传热分析、非定常流动问题、多相流模型、转动模型、组分输运与化学反应模型、流动分析后处理、UDF 使用及编写、典型工程实例等内容。书中配备了算例文件及屏录，能够较快地帮助读者学会并熟悉 FLUENT 的操作流程，掌握 FLUENT 的相关模型去解决实际工程问题。

谨祝本书与您分享的 FLUENT 流体分析与仿真技术能够帮助你在 CFD 研究领域有深入的拓展！

赵振兴

全国首届教学名师
河海大学流体力学教授
河海大学水力学及流体力学中心主任
教育部高校力学教学指导委员会委员
2010 年 2 月于南京

关于本书

内容和特点

计算流体力学是计算流体动力学的简称，英文名为 Computational Fluid Dynamics（缩写为 CFD）。它是基于离散化的数值计算方法，利用电子计算机对流体相对于不同固体边界的内外流场进行数值模拟和分析的学科，属于流体力学的一个分支。由于流体流动的复杂性，理论分析尚无法求得详细的解析解，计算流体力学正是弥补此不足而于 20 世纪 60 年代发展起来的，并相应地形成了各种数值解法，主要包括有限差分法、有限元法和有限体积法。

随着计算机技术的高速发展，关于计算流体力学数值计算的软件也逐渐兴起，自 1981 年以来，出现了如 PHOENICS、CFX、STAR-CD、FIDAP、FLUENT 等多个商用 CFD 软件。这些商用软件在工程界正发挥着越来越大的作用。其中，FLUENT 是 CFD 软件中相对成熟和运用最为广泛的商业软件。它基于有限体积法对计算区域进行离散，用户可以根据实际情况选择相应的算法对离散后的控制方程组进行求解。

FLUENT 是一个用于模拟和分析复杂几何区域内的流体流动与传热现象的专用软件，它提供了灵活的网格特性，可以支持多种网格，且以用户界面友好而著称，所以对初学者来说非常容易上手。FLUENT 的软件设计基于 CFD 软件群的思想，从用户需求角度出发，针对各种复杂流动的物理现象，采用不同的离散格式和数值方法，在特定领域内使计算速度、稳定性和精度等方面达到最佳组合，从而高效率地解决各个领域复杂流动问题的计算。

FLUENT 软件的不断完善与更新，使得其不仅作为一个研究工具，而且还作为设计工具在水利工程、土木工程、石油工程、天然气工程、环境工程、食品工程、海洋结构工程等领域发挥着巨大的作用。

正是因为 FLUENT 在流体工程模拟计算中发挥着重要的作用，流体分析与设计的相关行业人员及科技工作者对于学习 FLUENT 的热情都很高，所以作者结合自身的教学及工作经验，编写了这本 FLUENT 流体分析及仿真，本书在编写的过程中突出了以下特点。

(1) 直观易懂：全书以图解实例的形式介绍基础知识和实例操作，所有的实例操作过程都有图片介绍，直观易懂，使用户能够在最短的时间内获取知识。

(2) 实用性：全书采用了基础知识介绍和实例操作相结合的方法，互相补充，书本上的实例大多来源于生产实例，并且从用户的角度出发进行了简化和改进，同时在各内容关键处给予了有益的提示和指导，使用户在学完本书后能够快速地将知识应用于生产实践。

(3) 结构清晰，讲解详尽：全书采用基础知识－实训实例－综合实例的循序渐进的讲解方法，一步步地提高用户的 FLUENT 流体分析方法，而且每个知识点和实例都做了尽可能详细的讲解，使用户学习起来轻松自如。

(4) 多媒体示范：本书的配套光盘中提供了所有实例的视频操作，用户可以在观看视频的过程中增强对知识点的理解。

本书共分为 12 章，依次介绍了计算流体力学理论、流体流动分析概述、前处理网格生成、湍流模型、传热分析、非定常流动问题、多相流模型、转动模型、组分输运与化学反应模型、流动分析后处理、UDF 使用及编写、典型工程实例等内容。

- 第 1 章 计算流体力学理论。介绍流体力学的一些基本理论、计算流体力学的基本方程及 FLUENT 的计算原理。
- 第 2 章 流体流动分析概述。介绍流体流动分析的发展，涉及 CFD 的概念、CFD 软件及流动分析的应用领域，重点介绍 CFD 软件中运用最为广泛的 FLUENT 软件及其功能、运行方法和用户界面，并配有简单实例。
- 第 3 章 前处理网格生成。介绍网格生成的方法及 GAMBIT 软件的用户界面，详细讲解了 GAMBIT 的操作步骤，并配有实例。
- 第 4 章 湍流模型。介绍常用的湍流模型，以及利用 FLUENT 进行湍流流动模拟的操作过程，并配有实例。
- 第 5 章 传热分析。介绍传热的各种方法和应用领域，以及利用 FLUENT 进行传热分析的操作过程，并配有实例。
- 第 6 章 非定常流动问题。介绍非定常流动问题的概念，以及如何在 FLUENT 中进行非定常流动问题的计算，并配有实例。
- 第 7 章 多相流模型。介绍常见的几种多相流模型——VOF 模型、Mixture 模型和 Euler 模型，以及 FLUENT 中多相流模型的计算过程，并配有实例。
- 第 8 章 转动模型。介绍 FLUENT 中用于模拟移动和变形区域的流体流动问题的动参考系模型、滑移网格模型及动网格模型，并配有实例。
- 第 9 章 组分输运与化学反应模型。介绍利用 FLUENT 求解组分输运与化学反应问题，并配有实例。
- 第 10 章 流动分析后处理。针对流动分析后处理的需要，介绍利用 FLUENT 及 Tecplot 进行模拟结果后处理的操作过程，并配有实例。
- 第 11 章 UDF 使用及编写。介绍 UDF 的基础知识，UDF 宏及 UDF 的解释与编译，并配有实例讲解 UDF 的基本使用方法。
- 第 12 章 典型工程实例。结合石油天然气、环境、机械等工程领域的典型问题进行 FLUENT 流体分析及仿真的介绍，并配有实例。

光盘说明

本书配套 1 张多媒体 DVD 光盘，主要内容介绍如下。

1. 本书是基于 FLUENT 6.3.26 版本进行写作的，读者需要以不低于上述版本打开文件。
2. 光盘上的文件是只读文件，因此，需要将光盘上的源文件复制到电脑硬盘上，取消文件的“只读”属性，方能进行修改。
3. Ch*文件夹，其中*号代表某个数字，与本书的章对应，其中的文件是该章中使用到的文件，包括本书中所有操作实例的结果文件，对应文中的。
4. Ch*文件夹中的 AVI 文件夹用于存放本书所有操作实例的操作录像，对应文中的，直接双击需要播放的文件即可观看。

西南石油大学朱红钧编写了书中第 3～12 章，并对全书进行了统稿。西南石油大学林元华教授编写了第 1～2 章，进行了全书的修改与完善，并在编写过程中提供了全面的技术支持和充分的指导。香港中文大学谢龙汉博士对本书进行了校对和完善。另外，本书还得到了

人民邮电出版社的大力支持，在此一并致以深深的谢意！同时也非常感谢仿真科技论坛、工程流体网、流体中文网的广大网友的帮助和支持。

限于编写水平，且时间仓促，书中难免有疏漏之处，望广大读者给予指正。读者可通过电子邮件 swputicky@126.com 或者 reader.toptech@gmail.com 与我们交流，不胜感谢！

朱红钧

2010 年 2 月于成都

目录

第1章 计算流体力学理论 1
1.1 流体力学基本理论 1
1.1.1 研究对象 2
1.1.2 流体的物理性质 2
1.1.3 流体的分类 4
1.1.4 作用于流体上的力 5
1.1.5 流体流动的描述 6
1.1.6 流体流动的分类 8
1.1.7 气体动力学基础 9
1.2 计算流体力学基本方程 13
1.2.1 流体力学的连续性方程 13
1.2.2 流体力学的动量方程 14
1.2.3 流体力学的能量方程 17
1.2.4 流体力学基本方程的初始及边界条件 17
1.3 FLUENT 原理 19
1.3.1 有限体积法 19
1.3.2 流体区域离散 19
1.3.3 流场迭代求解方法 24
1.4 本章小结 35

第2章 流体流动分析概述 36
2.1 流动分析的发展 37
2.1.1 CFD 的提出 37
2.1.2 CFD 软件简介 38
2.1.3 流动分析的应用领域 39
2.2 FLUENT 软件简介 40
2.2.1 FLUENT 软件功能 41
2.2.2 UNIX 版本运行方法 43
2.2.3 Windows 版本运行方法 43
2.2.4 并行计算运行方法 43
2.2.5 FLUENT 的文件类型 44
2.3 FLUENT 的操作界面 45
2.3.1 图形用户界面 45
2.3.2 文本用户界面 48
2.3.3 图形控制及鼠标使用 49
2.4 本章小结 61

第3章　前处理网格生成 62
3.1　网格生成方法 63
3.1.1　结构化网格 63
3.1.2　非结构化网格 64
3.1.3　混合网格 66
3.2　网格生成前处理软件 GAMBIT 67
3.2.1　GAMBIT 基本界面 67
3.2.2　GAMBIT 的鼠标用法 72
3.2.3　GAMBIT 几何建模 74
3.2.4　GAMBIT 网格划分 82
3.2.5　GAMBIT 边界定义 88
3.2.6　与 CAD 软件的衔接 91
3.3　本章小结 104
第4章　湍流模型 105
4.1　常见的湍流模型 106
4.2　一方程模型 107
4.3　k-ε 模型 107
4.4　RSM 模型 110
4.5　LES 模型 111
4.6　本章小结 131
第5章　传热分析 132
5.1　传热方法 133
5.1.1　热传导 133
5.1.2　热对流 134
5.1.3　热辐射 135
5.2　传热分析的应用及方法 137
5.3　本章小结 168
第6章　非定常流动问题 169
6.1　概述 170
6.2　非定常流动的分析过程 170
6.3　本章小结 185
第7章　多相流模型 186
7.1　VOF 模型 187
7.1.1　VOF 模型的局限 187
7.1.2　VOF 模型的设置 187
7.2　Mixture 模型 188

7.2.1 Mixture 模型的局限 188
7.2.2 Mixture 模型的设置 189
7.3 Euler 模型 189
7.3.1 Euler 模型的局限 189
7.3.2 Euler 模型的设置 190
7.4 多相流模型的选择与设置 190
7.4.1 多相流模型选择的基本原则 190
7.4.2 混合模型和欧拉模型的选择细则 191
7.5 本章小结 220

第 8 章 转动模型 221
8.1 动参考系模型 222
8.1.1 动参考系模型概述 222
8.1.2 动参考系模型的设置 222
8.2 滑移网格模型 224
8.2.1 滑移网格模型概述 224
8.2.2 滑移网格模型的设置 225
8.3 动网格模型 226
8.3.1 动网格模型概述 226
8.3.2 动网格模型的设置 227
8.4 本章小结 252

第 9 章 组分输运与化学反应模型 253
9.1 概述 254
9.2 反应模型 254
9.3 通用有限速率模型 254
9.4 本章小结 277

第 10 章 流动分析后处理 278
10.1 FLUENT 后处理 279
10.1.1 FLUENT 的图形及可视化技术 279
10.1.2 FLUENT 的数据显示与文字报告 285
10.2 Tecplot 后处理 295
10.2.1 Tecplot 界面 296
10.2.2 Tecplot 读取 FLUENT 文件数据 297
10.2.3 Tecplot 绘图环境设置 299
10.2.4 Tecplot 图形及可视化技术 301
10.3 本章小结 314

第 11 章　UDF 使用及编写 315

11.1　用户自定义函数 316

11.1.1　UDF 概述 316

11.1.2　网格拓扑 317

11.1.3　数据类型 317

11.2　UDF 宏 318

11.2.1　访问 FLUENT 变量的预定义宏 318

11.2.2　实用工具宏 323

11.2.3　常用 DEFINE 宏 333

11.3　UDF 的解释与编译 336

11.3.1　UDF 的解释 336

11.3.2　UDF 的编译 336

11.4　本章小结 345

第 12 章　典型工程实例 346

12.1　T 型管内气液分离流动模拟 347

12.2　空气钻井环空气固两相流动模拟 355

12.3　气井井下节流流场模拟 365

12.4　齿轮泵内流体流动模拟 375

12.5　本章小结 388

第 1 章
计算流体力学理论

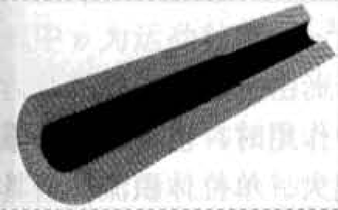
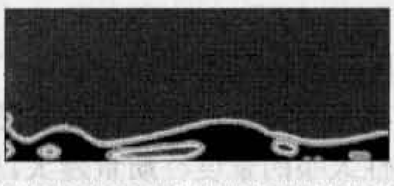
计算流体力学是计算流体动力学的简称，是基于离散化的数值计算方法，利用电子计算机对流体相对于不同固体边界的内外流场进行数值模拟和分析的学科，属于流体力学的一个分支。由于流体流动的复杂性，理论分析无法求得详细的解析解，计算流体力学正是为弥补此不足而于 20 世纪 60 年代发展起来的，并相应地形成了各种数值解法，主要包括有限差分法、有限元法和有限体积法。流体力学运动偏微分方程有椭圆型、抛物型、双曲型和混合型之分，计算流体力学很大程度上就是针对不同性质的偏微分方程采用并发展了相应的数值解法。

随着计算机技术的高速发展，关于计算流体力学数值计算的软件也逐渐兴起，其中 FLUENT 是 CFD 软件中相对成熟和运用最为广泛的商业软件。它基于有限体积法对计算区域进行离散，用户可以根据实际情况选择相应的算法对离散后的控制方程组进行求解。

本章主要介绍流体力学的一些基本理论、计算流体力学的基本方程及 FLUENT 的计算原理，帮助读者熟悉相关的基础理论与概念，了解 FLUENT 的基本原理，从而为进一步学习 FLUENT 的实际操作设置、数值计算运行、结果分析与整理打下基础。

本章要点

- 计算流体力学理论基础。
- 计算流体力学基本方程。
- FLUENT 流体分析基本原理。


1.1 流体力学基本理论

流体是指在任何微小切应力作用下都会发生连续不断变形的物质，这种连续不断的变形称为流动。流体与固体的区别在于，当施加一定外力时，固体也要发生变形，但变形量达到一定程度时其内部的变形抗力就会阻止固体继续变形，因此，固体能承受压力、拉力、切力，不呈现流动性，而流体不能在承受剪切力的同时，使自己保持静止的状态。

流体力学就是以流体为研究对象，研究其平衡、运动时宏观物理量（具有大量流体分子统计平均特性）的变化规律，及流体与固体之间相互作用的力学特点的一门学科。计算流体力学则主要利用数值计算方法来完成流体力学的研究任务，属于流体力学的分支。在利用计算流体力学方法进行流体流动的数值仿真之前，应首先了解流体力学相关的基本理论。

1.1.1 研究对象

流体由分子组成，分子之间有间距、不连续。由于我们研究的是平衡、运动时流体宏观物理量的变化规律及流体与固体之间的相互作用力，若通过研究分子运动来研究流体的运动是极其复杂且无此必要的。

一、流体质点

流体力学研究的对象是流体宏观物理量，因此研究的最小单元不是分子，而是具有确定统计平均特性且体积很小的（流体微团）流体质点。它具有“宏观小”、“微观大”的性质。

用一杯水打比方，流体质点的尺寸相对于杯子的特征长度 L 或 D 都小得多，但是相对于一个分子的长度来讲又大得多。

二、连续介质模型

连续介质模型是将流体视为没有空隙的由流体质点充满它所占据的整个空间的一种连续介质，且其所有的物理量都是空间坐标和时间的连续函数的一种假设模型。

把流体看作连续介质的单元体，则反映宏观流体的各种物理量都是空间坐标和时间的连续函数，这样就可以引用连续函数的解析方法来研究流体平衡和运动状态下有关物理参数之间的数量关系。

注意：当所研究的工程实际尺寸与分子的自由行程为相同或相近的数量级时，就不能应用连续介质模型，如稀薄气体。

1.1.2 流体的物理性质

流体具有惯性、压缩性、膨胀性、粘性和表面张力特性等物理性质，其中粘性是其区别于固体的一个重要的物理性质。

一、惯性

惯性是物质保持原有运动状态的特性，即使流体在不受外力作用时，也具有保持原有运动状态的属性。质量是流体惯性大小的量度，质量越大，惯性越大。单位体积流体所具有的质量称为密度，表达式如下：

$$\rho=\lim_{\Delta V\to 0}\frac{\Delta m}{\Delta V} \tag{1-1}$$

式中 ρ 为流体密度（kg/m^3），m 为流体质量（kg），V 为流体体积（m^3）。

二、压缩性

流体的压缩性是指温度不变的条件下，流体体积和密度随所受压力的变化而变化的性

质。可用体积压缩率来度量压缩性的大小，即压强增大一个单位值时，流体体积的相对减小值，表达式如下：

$$\beta = -\frac{dV/V}{dp} \tag{1-2}$$

式中β为体积压缩率（Pa^{-1}），p为所受的外部压强（Pa）。

三、膨胀性

流体的膨胀性为压强不变时，体积随温度而变化的性质。与压缩性类似，用温度变化1K时体积的相对变化来表示膨胀性的大小，表达式如下：

$$\alpha_v = \frac{dV/V}{dT} \tag{1-3}$$

式中α_v为体胀系数（K^{-1}），T为流体温度（K）。

四、粘性

粘性是流体区别于固体的一个重要性质，它是指流体在运动状态下具有抵抗剪切变形的能力。体现为流体流动时，流体层内部出现内摩擦力，阻碍质点做相对运动。此内摩擦力又称为切应力，其大小可由牛顿内摩擦定律计算得出：

$$\tau = \mu\frac{du}{dy} \tag{1-4}$$

式中τ为切应力（Pa），μ为流体动力粘度（Pa·s），du/dy为速度梯度（s^{-1}）。

注意：速度梯度实质上是流体运动时的剪切变形角速度，即流体的切应力与剪切变形角速度成正比。

表征流体粘性的物理量称为粘度，分为动力粘度μ与运动粘度υ两种，表达式如下：

$$\mu = \frac{\tau}{du/dy} \tag{1-5}$$

$$\upsilon = \frac{\mu}{\rho} \tag{1-6}$$

式中υ为运动粘度（m^2/s）。

流体粘性的本质是由流动流体的内聚力和分子动量交换引起的。一般在相同条件下，液体的粘度要大于气体粘度，并随着温度和压强的变化而变化。随着温度的升高，所有液体的粘度都减小，而气体的粘度增大。这是由于液体分子间距较小，相互吸引力即内聚力较大，粘性主要由内聚力造成。随着温度升高，分子间距增大，内聚力减小，从而使液体粘度减小。气体分子间距大，内聚力很小，粘性主要是气体分子动量交换的结果。温度升高时，气体分子运动加快，分子的动量交换速率加剧，切应力随之增加，从而造成粘度的增加。

五、表面张力特性

液体表面由于分子引力（分子间的内聚力）不均衡而产生的沿表面作用于任一界线上的张力，称为表面张力。如自由表面上，气体分子内聚力与液体分子内聚力有显著差别，使液

体分子有向内部收缩倾向，这一性质称为表面张力特性。

细管插入液体时，表面张力会使管中的液体自动上升或下降一个高度，这就是由于表面张力作用而导致的毛细现象。当液体与固体壁面接触时，若固体壁面吸附力大于液体内聚力，则液体与固体壁面的接触面有扩大的趋势，称为浸润现象（如水），反之称为不浸润现象（如水银）。

由于表面张力很小，一般情况下可以忽略不计，但在液体中模拟气泡运动时需要考虑表面张力的作用。

1.1.3 流体的分类

根据流体的压缩性、粘性等物理性质可以对流体进行下面 3 种分类。

一、可压缩流体与不可压缩流体

根据流体压缩性的大小，可以将流体分为可压缩流体与不可压缩流体。密度随压强变化较大且不可视为常数的流体，称为可压缩流体；反之，密度随压强变化很小且可视为常数的流体，称为不可压缩流体。

除了水击现象外，一般液流运动均可视为不可压缩流体进行分析计算。低速气体（$v<50m/s$）也可视为不可压缩流体，这是由于低速气体的压力和温度在整个流动过程中变化很小，它的重度和密度变化也很小，可近似看成常数。而高速气流则需考虑密度变化的影响，作为可压缩流体来处理。

二、理想流体与实际流体

根据是否考虑流体的粘性，把流体分为理想流体与实际流体两类。在理论研究的初期，学者们通常将流体看作没有粘性，即理想流体来考虑，大大简化了问题。而我们现在进行流体运动仿真时通常需要考虑流体的粘性，即当成实际流体处理，这样的模拟结果更贴近实际。

三、牛顿流体与非牛顿流体

根据流体是否满足牛顿内摩擦定律，可以把流体分为牛顿流体与非牛顿流体。

符合牛顿内摩擦定律，切应力与速度梯度成正比的流体为牛顿流体。切应力与速度梯度不符合线性分布，不满足牛顿内摩擦定律的流体为非牛顿流体，其又可分为塑性流体、假塑性流体与膨胀性流体 3 种，如图 1-1 所示。

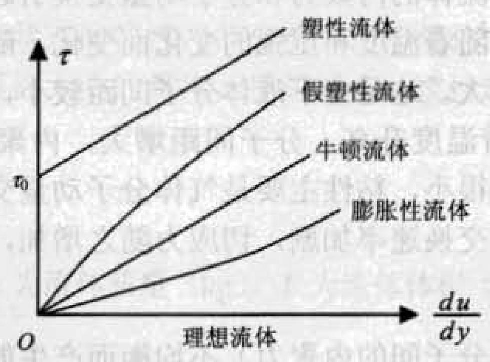


图1-1 流变曲线

塑性流体，如油漆、稀润滑脂等，它们受力后不能立刻变形，必须施加足以破坏其结构性的力才能发生剪切变形，即流动。因此该类流体存在屈服切应力τ_0，只有克服屈服切应力后，才能开始流动。其切应力与速度梯度满足如下关系：

$$\tau = \tau_0 + \mu \frac{du}{dy} \tag{1-7}$$

式中τ_0为屈服切应力（Pa）。

假塑性流体，如高分子溶液、乳化液等，粘度随速度梯度的增大而减小，其切应力与速度梯度的关系如下：

$$\tau = k(\frac{du}{dy})^n，n<1 \tag{1-8}$$

式中k为稠度系数，取决于流体性质；n为流变指数，无因次。

膨胀性流体，如淀粉糊、石灰浆等，其粘度随速度梯度的增大而增大，其切应力与速度梯度的关系如下：

$$\tau = k(\frac{du}{dy})^n，n>1 \tag{1-9}$$

1.1.4 作用于流体上的力

无论是平衡还是运动状态的流体都受到各种力的作用。作用在流体隔离体上的力，按其表现形式可以分为质量力和表面力两种。

一、质量力

作用在流体每一质点上，且与所作用流体的质量成正比的力为质量力。单位质量流体所受的质量力为单位质量力，它是一个矢量，形式如下：

$$\vec{f} = \frac{\vec{F}}{m} = f_x\vec{i} + f_y\vec{j} + f_z\vec{k} \tag{1-10}$$

式中下标x、y、z表示x、y、z三个方向，f为单位质量力（m/s^2）。

最常见的质量力有重力和惯性力两种。

(1) 重力。

$$G = mg \tag{1-11}$$

式中G为重力（N），m为质量（kg），g为重力加速度（m/s^2）。若z轴铅直向上，则单位质量重力的3个分力为$f_x=f_y=0$，$f_z=-g$。

(2) 直线惯性力。

$$I = -ma \tag{1-12}$$

式中I为直线惯性力（N），a为直线加速度（m/s^2）。单位质量直线惯性力为$f_x=-a_{ex}$，

$f_y = -a_{ey}$，$f_z = -a_{ez}$。

(3) 离心惯性力。

$$R = m\omega^2 r \tag{1-13}$$

式中 R 为离心惯性力（N），ω 为角速度（S^{-1}）。若为 xoy 平面的旋转加速运动，其 3 个方向的单位质量离心惯性力为 $f_x = \omega^2 x$，$f_y = \omega^2 y$，$f_z = 0$。

二、表面力

作用在流体表面上，并与受作用流体表面积成正比的力称为表面力。表面力可分为垂直于作用面的压力和平行于作用面的切力，如图 1-2 所示。

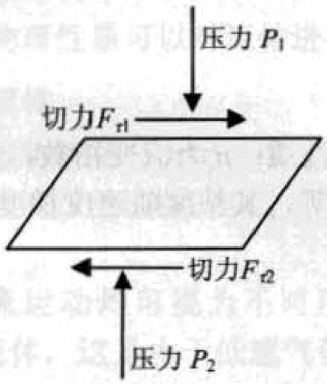


图1-2 流体微团上下表面所受两种表面力示意图

静止流体只受到压力作用，而单位面积上的压力称为压强，对流体内部一点而言，压强大小与方向无关。

理想流体运动时只受到压力作用，而实际运动的流体既受到压力作用，也受到切力作用。

通过上述分析可知流体受质量力和表面力两类力的共同作用，在一般运动中，这些力都有可能存在。但在一些特例中，可能只存在其中几个。因此，正确分析作用在流体上的力是研究流体平衡和运动规律的基础。

1.1.5 流体流动的描述

流体运动是由无数质点构成的连续介质的流动，描述流体运动的方法有拉格朗日法和欧拉法两种。

一、拉格朗日法

拉格朗日法把流体质点作为研究对象，着眼于观察质点的流动情况。通过研究每个质点的位置、压强、流速等物理量随时间的变化规律，综合流场中所有流体质点，得到整个流场流体的运动规律。以初始坐标 a、b、c 作为标记区别不同质点，则 t 时刻质点位置坐标可表示为：

$$\vec{r} = \vec{r}(a,b,c,t) \tag{1-14}$$

式中 a、b、c 为初始时刻质点的坐标，t 为时间（s）。

由此可得流速为：

$$\vec{u}=\frac{d\vec{r}}{dt}=\frac{\partial\vec{r}(a,b,c,t)}{\partial t} \tag{1-15}$$

质点加速度为：

$$\vec{a}=\frac{d\vec{u}}{dt}=\frac{\partial^2\vec{r}(a,b,c,t)}{\partial t^2} \tag{1-16}$$

二、欧拉法

欧拉法着眼于整个流场中各空间点流动参数随时间的变化，研究流体压强、流速等物理量在空间点上的分布规律，综合流场中的所有点，便可得到整个流场流动参数的变化规律。用欧拉法描述的流场内各处流速分布可表示为：

$$\vec{u}=\vec{u}(x,y,z,t) \tag{1-17}$$

若用 B 代表其他物理量，则密度、压强等物理量可表示为：

$$B=B(x,y,z,t) \tag{1-18}$$

式中 x、y、z 为流场中空间点的位置坐标，称为欧拉变数。

将物理量随时间的变化率称为质点随体导数，其表达式为：

$$\frac{dB(x,y,z,t)}{dt}=\frac{\partial B}{\partial t}\frac{dt}{dt}+\frac{\partial B}{\partial x}\frac{dx}{dt}+\frac{\partial B}{\partial y}\frac{dy}{dt}+\frac{\partial B}{\partial z}\frac{dz}{dt}=\frac{\partial B}{\partial t}+u_x\frac{\partial B}{\partial x}+u_y\frac{\partial B}{\partial y}+u_z\frac{\partial B}{\partial z} \tag{1-19}$$

若引入哈密顿微分算子：

$$\nabla=i\frac{\partial}{\partial x}+j\frac{\partial}{\partial y}+k\frac{\partial}{\partial z} \tag{1-20}$$

则有：

$$(\vec{u}\cdot\nabla)=u_x\frac{\partial}{\partial x}+u_y\frac{\partial}{\partial y}+u_z\frac{\partial}{\partial z} \tag{1-21}$$

所以随体导数的表达式可简写成：

$$\frac{d\vec{B}}{dt}=\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}+(\vec{u}\cdot\nabla)\vec{B} \tag{1-22}$$

由质点随体导数公式可得加速度的表达式为：

$$\vec{a}=\frac{d\vec{u}}{dt}=\frac{\partial\vec{u}}{\partial t}+(\vec{u}\cdot\nabla)\vec{u} \tag{1-23}$$

可见加速度由两项组成，其中 $\frac{\partial\vec{u}}{\partial t}$ 称为时变加速度（或当地加速度），即表示流动过程中流体质点由于速度随时间变化而引起的加速度；$(\vec{u}\cdot\nabla)\vec{u}$ 称为迁移加速度（或位变加速度），

即表示流动过程中流体质点由于速度随位置变化而引起的加速度。

由于研究流体运动常需要从整个流场角度分析流速、压强分布及变化规律，因此欧拉法运用更为广泛。

1.1.6 流体流动的分类

根据流体流动过程中物理属性的变化及流体的结构、流态等，可以将流体流动进行下面几种分类。

一、定常流动与非定常流动

按流动要素是否随时间变化可以将流体流动分为定常流动与非定常流动。定常流动（又称稳定流或恒定流）是指流场中任一空间点上各运动要素均不随时间变化的流动，而非定常流动（又称非稳定流或非恒定流）中至少有一个运动要素要随时间变化。因此，可用时变加速度来判别定常流或非定常流。若$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t}=0$，可认为作定常流动；若$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t}\neq 0$，则为非定常流动。

二、均匀流与非均匀流

均匀流是指沿流动方向流场中各点的流速（包括大小与方向）均相同的流动，而非均匀流是指流场中相应点的流速大小和方向只要有一个沿程改变的流动。因此，可用迁移加速度来判别均匀流或非均匀流。若$(\vec{u}\cdot\nabla)\vec{u}=0$，如等直径直管中的流体流动，可近似为均匀流动；若$(\vec{u}\cdot\nabla)\vec{u}\neq 0$，如收缩管、扩张管、弯管内的流体流动为非均匀流动，如图 1-3 所示。

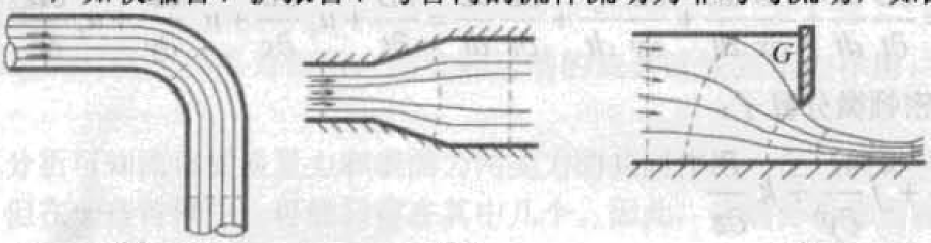


图1-3 常见的非均匀流动

三、渐变流与急变流

非均匀流又可以分为渐变流与急变流，渐变流是指非均匀流中流动沿程变化缓慢，因加速度产生的惯性（离心）力很小，相对于重力可以忽略不计的流动，因此渐变流可近似为均匀流求解问题。而急变流是指流动沿程急剧改变的非均匀流动，其流线间夹角很大或曲率半径较小或二者兼而有之，因而惯性力不能忽略。

四、层流与湍流

若流体质点互不掺混，有条不紊地作有序的成层流动，这种流动状态称为层流。反之，流体质点相互掺混，作无序的随机运动，此时的流动状态称为湍流（紊流）。对于湍流而言，其局部速度、压力等物理量在时间和空间中都可能发生不规则的脉动。

依据雷诺数的大小可以判别流体作层流或湍流流动。雷诺数的表达式如下：

$$Re=\frac{vl}{\upsilon} \tag{1-24}$$

式中 Re 为雷诺数，l 为特征长度（m）。

对于圆管内流动，特征长度 l 可取为圆管管径 d，其临界雷诺数通常为 2000，即 $Re=\frac{vd}{\upsilon}<2000$ 为层流，否则为湍流。

对于非圆管流动，特征长度 l 取为当量直径 d_H，临界雷诺数根据实际问题而定，如正方形和正三角形的临界雷诺数仍可近似取为 2000，而偏心环空缝隙仅为 1000。其中 d_H 表示如下：

$$d_H=4\frac{A}{\chi} \tag{1-25}$$

式中 A 为过流断面面积（m^2），χ 为湿周（m）。

五、有旋流与无旋流

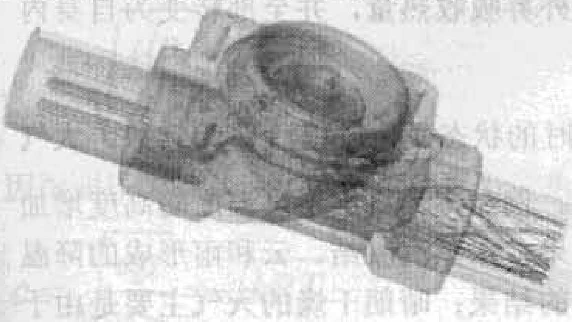
流体具有连续变形的性质，因此，除了可表现出刚体质点运动的平移与旋转外，还可以表现出变形运动。按照流体微团运动是否存在旋转，可以将流动分为无旋流动和有旋流动，依据为旋转角速度 $\vec{\varpi}$ 是否等于零，其表达式如下：

$$\vec{\varpi}=\frac{1}{2}\begin{vmatrix} i & j & k \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ u_x & u_y & u_z \end{vmatrix} \tag{1-26}$$

若 $\vec{\varpi}=0$，则为无旋流动，否则为有旋流动。

六、内部流动与外部流动

根据流体所在的流动空间区域，可以将流动分为内部流动和外部流动，如图 1-4 所示。内部流动是指在一定结构的限制空间内的流动，如管道和渠道内的流动。外部流动是指流体从物体外侧绕过的流动，如圆柱绕流等。


（a）阀门内部流动

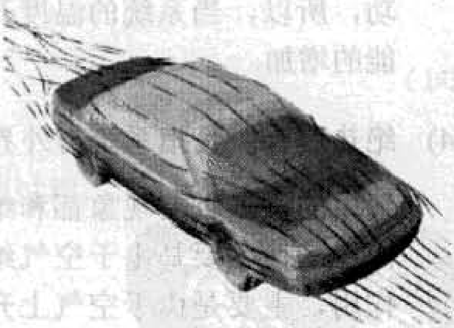

（b）汽车外部绕流

图1-4　内外部流动示意图

1.1.7 气体动力学基础

流体包括气体，而气体具有明显的可压缩性，即在流动过程中其密度是变量，需要充分考虑其压缩性对流动的影响，气体动力学正是以可压缩气体流动规律为研究对象的。下面简单介绍一些重要的气体动力学的基础知识。

热量交换，也没有能量交换，简称无能耗的绝热过程，其$\frac{p}{\rho^k}$等于常数，k 为卡门系数，对于空气而言，k=1.4。

二、声速与马赫数

(1) 声速：是指微弱压力扰动波在可压缩介质中的传播速度。在实际气流中，由于气体具有可压缩性，某一扰动不能在一瞬间传遍整个流场，而是以波面的形式逐渐向前推进。如图 1-5 所示，在等直管的左端放一活塞，以速度 v 向右轻微推动 dt 时刻，此时活塞先压缩与活塞面直接接触的那一层气体，该层气体进而压缩邻层，邻层再压缩下一邻层，从而在直管中一直传播下去，形成一道微弱的压缩波。波面为未扰动和已扰动区域的分界面，称为波头，波面向前传播的速度就是声速。

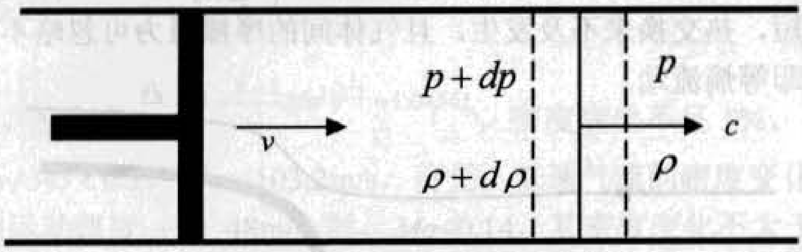


图1-5　微弱压力波传播

由于波面左侧气体已被压缩，而右侧气体未被压缩，所以波面左右的压强分别为 $p+dp$ 和 p，密度分别是 $\rho+d\rho$ 和 ρ。取动坐标系在波头上，则右侧气体速度为$-c$，左侧气体速度为$v-c$，建立连续性方程与动量方程：

$$\rho A(-c)=(\rho+d\rho)(v-c)A \tag{1-30 a}$$

$$(p+dp)A-pA=\rho q_v[-c-(v-c)] \tag{1-30 b}$$

考虑微弱扰动的 $d\rho/\rho<<1$，联立上式解得：

$$c=\sqrt{\frac{dp}{d\rho}} \tag{1-31}$$

因微弱压力扰动波传播过程可视为绝热无摩阻的等熵过程，所以：

$$c=\sqrt{\frac{dp}{d\rho}}=\sqrt{kRT} \tag{1-32}$$

式（1-32）即为气体的声速公式。声速 c 的物理意义为表征气体可压缩的难易程度，压缩性越大，声速越小。

注意：公式 $c=\sqrt{dp/d\rho}$ 对气体、液体均适用。对液体，由体积模量 $K=\rho dp/d\rho$，可知 $c=\sqrt{K/\rho}$。

(2) 马赫数：为某处气流速度 v 与该处声速 c 的比值，记作 Ma，其表达式如下：

$$Ma = \frac{v}{c} \tag{1-33}$$

Ma 为气体动力学中十分重要的一个无量纲物理参数，可衡量气体压缩性的大小，Ma 越大，可压缩性影响就越大。$Ma>1$ 的气流为超声速气流，$Ma<1$ 的气流为低声速气流，$Ma=1$ 的气流为声速气流。

三、滞止参数

将流动的气体等熵地滞止到储气箱内，使其变为静止的气体，此时相应的运动参数称为滞止参数。滞止参数用下标“0”表示，如 p_0、ρ_0、T_0。

为分析滞止参数，我们就需要创造等熵过程并使气流速度降为零。参照毕托管原理，设置流动方向上的驻点，如图 1-6 所示；气流到达驻点（滞止点）时，流速降为零；由于滞止点前的流动流程较短，热交换来不及发生，且气体间的摩擦阻力可忽略不计，故可以视为无摩阻的绝热流动，即等熵流动。

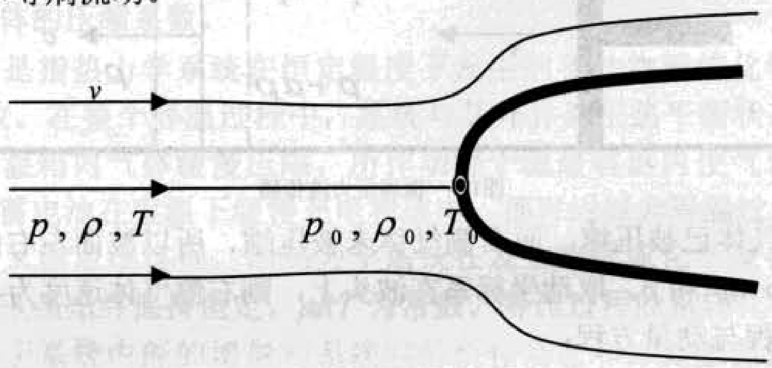


图1-6　滞止过程

建立该过程的能量方程如下：

$$\frac{kRT}{k-1} + \frac{v^2}{2} = \frac{kRT_0}{k-1} \tag{1-34}$$

为了求滞止温度，我们可将式（1-34）表示为与原温度的比值，并表示为马赫数的函数：

$$\frac{T_0}{T} = 1 + \frac{k-1}{2}\frac{v^2}{kRT} = 1 + \frac{k-1}{2}\frac{v^2}{c^2} = 1 + \frac{k-1}{2}Ma^2 \tag{1-35}$$

又由等熵过程方程 $\frac{p}{\rho^k} = const$ 和状态方程 $p/\rho = RT$，可得：

$$\frac{p_0}{p} = (\frac{\rho_0}{\rho})^k \tag{1-36 a}$$

$$\frac{\rho_0}{\rho} = (\frac{T_0}{T})^{\frac{1}{k-1}} \tag{1-36 b}$$

$$\frac{p_0}{p}=(\frac{T_0}{T})^{\frac{k}{k-1}} \tag{1-36 c}$$

因此，其他滞止参数的函数为：

$$\frac{p_0}{p}=(1+\frac{k-1}{2}Ma^2)^{\frac{k}{k-1}} \tag{1-37 a}$$

$$\frac{\rho_0}{\rho}=(1+\frac{k-1}{2}Ma^2)^{\frac{1}{k-1}} \tag{1-37 b}$$

$$\frac{c_0}{c}=(\frac{T_0}{T})^{\frac{1}{2}}=(1+\frac{k-1}{2}Ma^2)^{\frac{1}{2}} \tag{1-37 c}$$

当 Ma=0.3 时，空气的 $\frac{\rho_0}{\rho}=(1+\frac{k-1}{2}Ma^2)^{\frac{1}{k-1}}=1.04561$，密度变化不足 5%。而对于 20℃的空气来说，$Ma=v/c=v/343<0.3$，即 v<103.2m/s，可见，低速气流的密度变化较小。

常温下空气的运动速度 v=0~48m/s 时，Ma<0.14，其密度变化不大于 1%。因此，当空气的速度 v<50m/s 时，可视作不可压缩流体。

1.2 计算流体力学基本方程

流体流动要遵循物理守恒定律，这些定律主要包括质量守恒定律、动量守恒定律、能量守恒定律。如果流动涉及不同组分的混合或相互作用，还要遵守组分守恒定律。在实际计算时，还要考虑不同的流态，如湍流要遵守附加的湍流输运方程。

计算流体力学的基本方程是这些守恒定律的描述，下面详细介绍这些基本守恒定律对应的控制方程，有关湍流的附加控制方程将在第 4 章中介绍。

1.2.1 流体力学的连续性方程

连续性方程即质量守恒方程，任何流动问题都必须满足质量守恒定律。按照质量守恒定律，单位时间内流出控制体的流体净质量之总和应等于同时间间隔控制体内因密度变化而减少的质量，由此可导出流体流动连续性方程的微分形式如下：

$$\frac{\partial\rho}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z}=0 \tag{1-38}$$

式中，u_x、u_y、u_z 分别为 x、y、z 三个方向的速度分量（m/s），t 为时间（s），ρ 为密度（kg/m^3）。

引入哈密顿微分算子：

$$\nabla = i\frac{\partial}{\partial x} + j\frac{\partial}{\partial y} + k\frac{\partial}{\partial z} \tag{1-39}$$

则式（1-38）可表示为：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho \vec{u}\right) = 0 \tag{1-40}$$

或表示成散度的形式：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + div\left(\rho \vec{u}\right) = 0 \tag{1-41}$$

对于圆柱坐标系，连续性方程形式为：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\rho u_r}{r} + \frac{\partial(\rho u_r)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho u_\theta)}{r\partial \theta} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} = 0 \tag{1-42}$$

上面给出的是通用的一般形式的连续性方程。若对于恒定流，$\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$，其形式变为：

$$\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} = 0 \tag{1-43}$$

若为不可压缩流动，ρ 为常数，则有：

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \tag{1-44}$$

其柱坐标系形式为：

$$\frac{u_r}{r} + \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{\partial u_\theta}{r\partial \theta} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \tag{1-45}$$

1.2.2 流体力学的动量方程

动量方程的本质是满足牛顿第二定律。该定律可描述为：对于一给定的流体微元，其动量对时间的变化率等于外界作用在该微元体上的各种力之和。依据这一定律，可导出 x、y 和 z 三个方向的动量方程如下：

$$\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho u_x \vec{u}\right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \tag{1-46 a}$$

$$\frac{\partial(\rho u_y)}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho u_y\vec{u})=-\frac{\partial p}{\partial y}+\frac{\partial\tau_{xy}}{\partial x}+\frac{\partial\tau_{yy}}{\partial y}+\frac{\partial\tau_{zy}}{\partial z}+\rho f_y \tag{1-46 b}$$

$$\frac{\partial(\rho u_z)}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho u_z\vec{u})=-\frac{\partial p}{\partial z}+\frac{\partial\tau_{xz}}{\partial x}+\frac{\partial\tau_{yz}}{\partial y}+\frac{\partial\tau_{zz}}{\partial z}+\rho f_z \tag{1-46 c}$$

式中，p 为流体微元体上的压强（Pa），τ_{xx}、τ_{xy}、τ_{xz} 等是因分子粘性作用而产生的作用在微元体表面上的粘性应力 τ 的分量（Pa），f_x、f_y、f_z 为 3 个方向的单位质量力（m/s^2），若质量力只受重力，且 z 轴垂直向上，则 $f_x=f_y=0$，$f_z=-g$。

有广义内摩擦定律（本构方程）：

$$\tau_{xx}=2\mu\frac{\partial u_x}{\partial x}+\lambda\nabla\cdot\vec{u} \tag{1-47 a}$$

$$\tau_{yy}=2\mu\frac{\partial u_y}{\partial y}+\lambda\nabla\cdot\vec{u} \tag{1-47 b}$$

$$\tau_{zz}=2\mu\frac{\partial u_z}{\partial z}+\lambda\nabla\cdot\vec{u} \tag{1-47 c}$$

$$\tau_{xy}=\tau_{yx}=\mu\left(\frac{\partial u_x}{\partial y}+\frac{\partial u_y}{\partial x}\right) \tag{1-47 d}$$

$$\tau_{xz}=\tau_{zx}=\mu\left(\frac{\partial u_x}{\partial z}+\frac{\partial u_z}{\partial x}\right) \tag{1-47 e}$$

$$\tau_{yz}=\tau_{zy}=\mu\left(\frac{\partial u_y}{\partial z}+\frac{\partial u_z}{\partial y}\right) \tag{1-47 f}$$

式中，μ 为动力粘度（Pa·s），λ 为第二粘度（Pa·s），通常取为-2/3。则式（1-46）化为：

$$\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho u_x\vec{u})=-\frac{\partial p}{\partial x}+\nabla\cdot(\mu\,\mathrm{grad}\,u_x)+S_{u_x} \tag{1-48 a}$$

$$\frac{\partial(\rho u_y)}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho u_y\vec{u})=-\frac{\partial p}{\partial y}+\nabla\cdot(\mu\,\mathrm{grad}\,u_y)+S_{u_y} \tag{1-48 b}$$

$$\frac{\partial(\rho u_z)}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho u_z\vec{u})=-\frac{\partial p}{\partial z}+\nabla\cdot(\mu\,\mathrm{grad}\,u_z)+S_{u_z} \tag{1-48 c}$$

式中，S_{ux}、S_{uy}、S_{uz} 为广义源项，$S_{ux}=\rho f_x+S_x$，$S_{uy}=\rho f_y+S_y$，$S_{uz}=\rho f_z+S_z$，其中 S_x、S_y、S_z 为：

$$s_x=\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\frac{\partial u_x}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial u_y}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\mu\frac{\partial u_z}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda\nabla\cdot\vec{u}\right) \tag{1-49 a}$$

$$s_y=\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\frac{\partial u_x}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial u_y}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\mu\frac{\partial u_z}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda\nabla\cdot\vec{u}\right) \tag{1-49 b}$$

$$s_z=\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\frac{\partial u_x}{\partial z}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial u_y}{\partial z}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\mu\frac{\partial u_z}{\partial z}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda\nabla\cdot\vec{u}\right) \tag{1-49 c}$$

对于粘性为常数的不可压缩流体，s_x、s_y、s_z 通常取为 0。

动量方程在实际应用中有许多表达形式，其中比较常见的有如下几种。

(1) 可压缩粘性流体的动量方程。

$$\rho\frac{du_x}{dt}=\rho f_x+\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial x}\left\{\mu\left[2\frac{\partial u_x}{\partial x}-\frac{2}{3}\left(\frac{\partial u_x}{\partial x}+\frac{\partial u_y}{\partial y}+\frac{\partial u_z}{\partial z}\right)\right]\right\}+\frac{\partial}{\partial y}\left[\mu\left(\frac{\partial u_x}{\partial y}+\frac{\partial u_y}{\partial x}\right)\right]+\frac{\partial}{\partial z}\left[\mu\left(\frac{\partial u_z}{\partial x}+\frac{\partial u_x}{\partial z}\right)\right] \tag{1-50 a}$$

$$\rho\frac{du_y}{dt}=\rho f_y+\frac{\partial p}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial y}\left\{\mu\left[2\frac{\partial u_y}{\partial y}-\frac{2}{3}\left(\frac{\partial u_x}{\partial x}+\frac{\partial u_y}{\partial y}+\frac{\partial u_z}{\partial z}\right)\right]\right\}+\frac{\partial}{\partial z}\left[\mu\left(\frac{\partial u_y}{\partial z}+\frac{\partial u_z}{\partial y}\right)\right]+\frac{\partial}{\partial x}\left[\mu\left(\frac{\partial u_x}{\partial y}+\frac{\partial u_y}{\partial x}\right)\right] \tag{1-50 b}$$

$$\rho\frac{du_z}{dt}=\rho f_z+\frac{\partial p}{\partial z}+\frac{\partial}{\partial z}\left\{\mu\left[2\frac{\partial u_z}{\partial z}-\frac{2}{3}\left(\frac{\partial u_x}{\partial x}+\frac{\partial u_y}{\partial y}+\frac{\partial u_z}{\partial z}\right)\right]\right\}+\frac{\partial}{\partial x}\left[\mu\left(\frac{\partial u_z}{\partial x}+\frac{\partial u_x}{\partial z}\right)\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[\mu\left(\frac{\partial u_y}{\partial z}+\frac{\partial u_z}{\partial y}\right)\right] \tag{1-50 c}$$

(2) 常粘性流体的动量方程。

$$\rho\frac{d\vec{u}}{dt}=\rho\vec{f}-\mathrm{grad}p+\frac{\mu}{3}\mathrm{grad}\left(\nabla\cdot\vec{u}\right)+\mu\nabla^2\vec{u} \tag{1-51}$$

(3) 常密度粘性流体的动量守恒方程。

$$\rho\frac{d\vec{u}}{dt}=\rho\vec{f}-\mathrm{grad}p+\mu\nabla^2\vec{u} \tag{1-52}$$

(4) 无粘性流体的动量守恒方程。

$$\rho\frac{d\vec{u}}{dt}=\rho\vec{f}-\mathrm{grad}p \tag{1-53}$$

(5) 静力学方程。

$$\rho\vec{f}=\mathrm{grad}p \tag{1-54}$$

1.2.3 流体力学的能量方程

能量守恒定律是包含有热交换的流动系统必须满足的基本定律，其本质是热力学第一定律。依据能量守恒定律，微元体中能量的增加率等于进入微元体的净热流通量加上质量力与表面力对微元体所做的功，可得其表达式为：

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t}+\nabla\cdot\left[\vec{u}(\rho E+p)\right]=\nabla\cdot\left[k_{eff}\nabla T-\sum_j h_jJ_j+\left(\tau_{eff}\cdot\vec{u}\right)\right]+S_h \tag{1-55}$$

式中，E 为流体微团的总能（J/kg），包含内能、动能和势能之和，$E=h-\frac{p}{\rho}+\frac{u^2}{2}$，$h$ 为焓（J/kg），h_j 为组分 j 的焓（J/kg），定义为 $h_j=\int_{T_{ref}}^{T}C_{p,j}dT$，其中 T_{ref}=298.15K；k_{eff} 为有效热传导系数（W/(m·K)），$k_{eff}=k+k_t$，k_t 为湍流热传导系数，根据所用的湍流模型来确定；J_j 为组分 j 的扩散通量；S_h 为包括了化学反应热及其他用户定义的体积热源项。

注意：尽管能量方程是流动、传热问题的基本方程，但对于不可压缩流动，若热交换很小可以忽略时，可不考虑能量方程。

1.2.4 流体力学基本方程的初始及边界条件

初始条件和边界条件是控制方程有确定解的前提，控制方程与相应的初始条件和边界条件构成对一个物理过程完整的数学描述。现有的 CFD 软件都提供了现成的各种类型的边界条件，这里简单介绍一下有关的初始条件和边界条件。

一、初始条件

初始条件是所研究对象在过程开始时刻各个求解变量的空间分布情况，顾名思义，就是计算初始时刻给定的参数。如 $t=t_0$ 时各变量的函数分布为：

$$u_x=u_x(x,y,z,t_0)=u_{x0}(x,y,z) \tag{1-56 a}$$
$$u_y=u_y(x,y,z,t_0)=u_{y0}(x,y,z) \tag{1-56 b}$$
$$u_z=u_z(x,y,z,t_0)=u_{z0}(x,y,z) \tag{1-56 c}$$
$$p=p(x,y,z,t_0)=p_0(x,y,z) \tag{1-56 d}$$

$$\rho=\rho(x,y,z,t_0)=\rho_0(x,y,z) \tag{1-56 e}$$

$$T=T(x,y,z,t_0)=T_0(x,y,z) \tag{1-56 f}$$

对于非定常问题，必须给定初始条件，而对于定常问题，不需要初始条件。

二、边界条件

边界条件是在求解区域的边界上所求解的变量或其导数随地点和时间的变化规律。对于任何问题，都必须给定边界条件。例如，流体限于固体壁面包裹的空间内流动，不能有穿过固壁的速度分量；在自由液面上，大气压强认为是常数；在流体与外界无热传导的边界上，流体与边界之间无温差等。

通常流体边界可分为流固交界面和流流（液液、液气）交接面。

(1) 流固交界面边界条件。

流体在管内流动时的管壁，飞机、船舶在空气及水中运动时的气固或液固交界面，河水在岸边及河床的液固交界面都属于流固交界面。

对于粘性流体，流体将粘附于固体表面，满足无滑移边界条件，即：

$$v|_F=v|_S \tag{1-57}$$

式中，$v|_F$是流体速度（m/s），$v|_S$是固体壁面相应点的速度（m/s）。

对于理想流体，流体可沿界面滑移，即有速度的切向分量，但不能脱离界面，即：

$$v_n|_F=v_n|_S \tag{1-58}$$

式中，$v_n|_F$为流体的法向速度分量（m/s），$v_n|_S$为固体壁面相应点的法向速度分量（m/s）。

(2) 液液交界面边界条件。

密度不同的两种液体的交界面，如油水，属于液液交界面。对于此类分界面两侧的液体应满足：

$$v_1=v_2 \tag{1-59 a}$$

$$T_1=T_2 \tag{1-59 b}$$

$$p_1=p_2 \tag{1-59 c}$$

$$\mu_1\left.\frac{\partial u}{\partial n}\right|_1=\mu_2\left.\frac{\partial u}{\partial n}\right|_2 \tag{1-59 d}$$

$$k_1\left.\frac{\partial T}{\partial n}\right|_1=k_2\left.\frac{\partial T}{\partial n}\right|_2 \tag{1-59 e}$$

(3) 液气交界面边界条件。

水与大气的接触面，自由液面即是液气交界面。自由液面的运动学条件为：

$$\frac{\partial F}{\partial t}+\vec{u}\cdot\nabla F=0 \tag{1-60}$$

式中，F 代表自由液面上的所有物理变量。

当不考虑表面张力时，自由液面压强应满足：

$$p=p_a \tag{1-61}$$

式中，p_a为大气压强，一个标准大气压为 101.325kPa。

1.3 FLUENT 原理

计算流体力学数学模型是一系列的偏微分方程组，要得到解析解相当困难，目前均采用数值方法得到满足实际需要的近似解。其基本思路是对流体区域进行离散化，通过一定的原则建立离散区域节点上的代数方程，求解代数方程以获得所求解变量的近似解。现有计算流体力学求解计算中用得较多的数值方法有：有限差分法、有限元法和有限体积法，FLUENT 所采用的是有限体积法，其对流场迭代求解的方法主要有 SIMPLE 算法、SIMPLEC 算法和 PISO 算法等。下面针对 FLUENT 所采用的数值计算方法进行逐一介绍。

1.3.1 有限体积法

有限体积法（简称 FVM），又称有限容积法，是近年来发展非常迅速的一种离散化方法，其特点是计算效率高。目前在 CFD 领域得到了广泛的应用，大多数商用 CFD 软件都采用了这种方法，如 FLUENT、STAR-CD、CFX 等。

有限体积法将所计算的区域划分成一系列控制体积，每个控制体积都有一个节点作代表，通过将控制方程对控制体积作积分来导出离散方程。在积分的过程中，需要对控制体积界面上的被求函数本身（对流通量）及其一阶导数（扩散通量）的构成做出假定，这就形成了不同的格式。由于扩散项多是采用相当于二阶精度的线性插值，因而格式的区别主要体现在对流项上。

用有限体积法导出的离散方程可以保证具有守恒特性，而且离散方程系数的物理意义明确，是目前流动与传热问题的数值计算中应用最广泛的一种方法。

1.3.2 流体区域离散

在对特定问题进行数值计算前，首先要将计算区域离散化，即对空间上连续的计算区域进行划分，把其划分为多个子区域，并确定每个区域的节点，从而生成网格。然后，将控制方程在网格上离散，即将偏微分格式的控制方程转化为各个节点上的代数方程组。

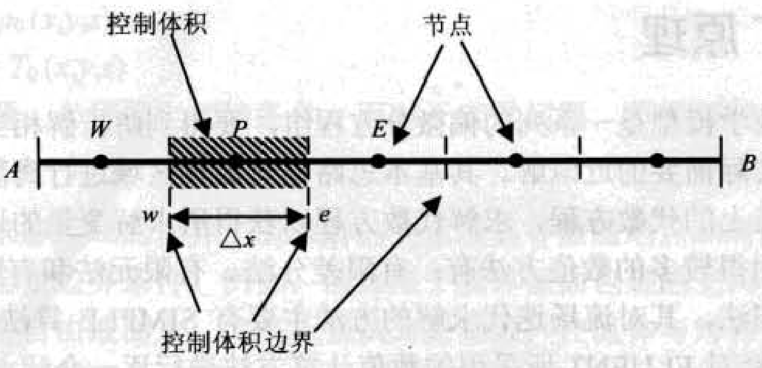
一、计算区域的离散

有限体积法的区域离散实质上是把计算的区域划分为许多个互不重叠的子区域，并确定每个子区域的节点位置及该节点所代表的控制体积。

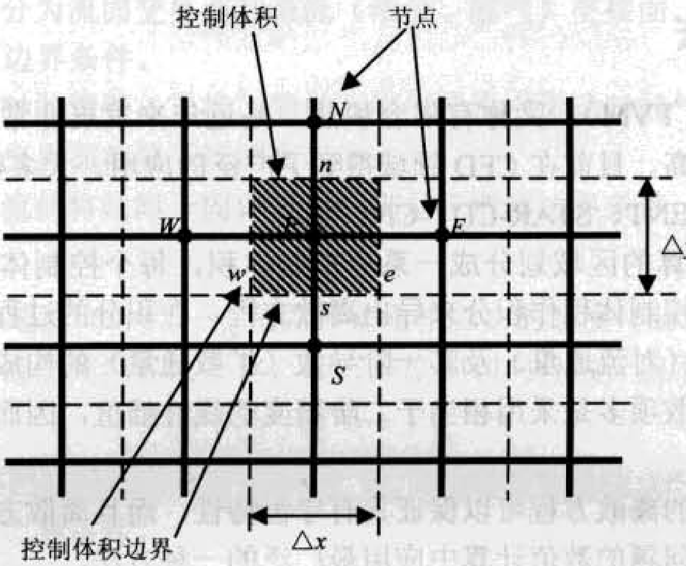
区域离散后的几何要素主要有 4 种：

- 节点（node），需要求解的未知物理量的几何位置；
- 控制体积（control volume），应用控制方程或守恒定律的最小几何单位；
- 界面（face），各节点相应控制体积的交界面；
- 网格线（grid line），连接相邻两节点而形成的曲线簇。

在离散的过程中，将一个控制体积上的物理量定义并存储在节点上。一维与二维问题的有限体积法计算网格如图 1-7 所示，图中标出了节点、控制体积、界面与网格线。



（a）一维问题的有限体积法计算网格



（b）二维问题的有限体积法计算网格

图1-7　有限体积法计算网格

计算区域离散的网格有两类：结构化网格和非结构化网格，结构化网格的节点排列有序，即当给出了一个节点编号后，立即可以得出其相邻节点的编号，所有内部节点周围的网格数目相同；非结构化网格的内部节点以一种不规则的方式布置在流场中，各节点周围的网格数目不尽相同，其网格生成复杂，但却有极大的适应性。关于结构化网格与非结构化网格的详细介绍见第 3 章。

二、控制方程的离散

- 控制方程的通用形式为：

$$\frac{\partial(\rho u\phi)}{\partial t}+div(\rho u\phi)=div(\Gamma \mathrm{grad}\phi)+S \tag{1-62}$$

式中，ϕ为广义变量，可以为速度、温度或浓度等一些待求的物理量；Γ 为相应于ϕ的广义扩散系数；S为广义源项。

- 一维稳态对流—扩散问题的离散方程为：

$$a_p\phi_p=a_w\phi_w+a_E\phi_E+b \tag{1-63}$$

其中：

$$
\begin{cases}
a_w = \dfrac{\Gamma_w}{(\delta x)_w} A_w + \dfrac{(\rho u)_w}{2} A_w \\
a_E = \dfrac{\Gamma_e}{(\delta x)_e} A_e - \dfrac{(\rho u)_e}{2} A_e \\
a_p = \dfrac{\Gamma_e}{(\delta x)_e} A_e + \dfrac{\Gamma_w}{(\delta x)_w} A_w - S_p \cdot \Delta V = a_E + a_w + \dfrac{(\rho u)_e}{2} A_e - \dfrac{(\rho u)_w}{2} A_w - S_p \cdot \Delta V \\
b = S_C \cdot \Delta V
\end{cases}
\tag{1-64}
$$

式中，A 为控制体积界面的面积；ΔV 是控制体积的体积。

- 一维瞬态对流—扩散问题的离散方程为：

$$
\begin{aligned}
a_p\phi_p = {} & a_w\left[f\phi_w + (1-f)\phi_w^0\right] + a_E\left[f\phi_E + (1-f)\phi_E^0\right]\phi_E \\
& + \left\{\rho\frac{\Delta V}{\Delta t} - (1-f)\left[D_e + \frac{F_e}{2}\right] - (1-f)\left[D_w - \frac{F_w}{2}\right] + (1-f)S_p\Delta V\right\}\phi_p^0 + S_C\Delta V
\end{aligned}
\tag{1-65}
$$

其中：

$$
\begin{cases}
a_p = a_p^0 + f\left(a_E + a_w\right) + f\left(F_e - F_w\right) - fS_p\Delta V \\
a_w = D_w + \dfrac{F_w}{2} \\
a_e = D_e - \dfrac{F_e}{2} \\
a_p^0 = \rho\dfrac{\Delta V}{\Delta t}
\end{cases}
\tag{1-66}
$$

- 二维瞬态对流—扩散问题的离散方程为：

$$
a_p\phi_p = a_w\phi_w + a_E\phi_E + a_N\phi_N + a_S\phi_S + b \tag{1-67}
$$

其中：

$$
\begin{cases}
a_p = a_p^0 + a_E + a_w + a_S + a_N + \left(F_e - F_w\right) + \left(F_n - F_s\right) - S_p\Delta V \\
a_w = D_w + \max\left(0, F_w\right) \\
a_e = D_e + \max\left(0, -F_e\right) \\
a_s = D_s + \max\left(0, F_s\right) \\
a_n = D_n + \max\left(0, -F_n\right) \\
a_p^0 = \rho_p^0\dfrac{\Delta V}{\Delta t} \\
b = S_C\Delta V + a_p^0 + \phi_p^0
\end{cases}
\tag{1-68}
$$

- 三维瞬态对流—扩散问题的计算区域在 XOY 和 XOZ 平面上投影如图 1-8 所示，其离散方程为：

$$
a_p\phi_p = a_w\phi_w + a_E\phi_E + a_N\phi_N + a_S\phi_S + a_T\phi_T + a_B\phi_B + b \tag{1-69}
$$

其中：

$$
\begin{cases}
a_p = a_p^0 + a_E + a_w + a_S + a_N + (F_e - F_w) + (F_n - F_s) + (F_t - F_b) - S_p \Delta V \\
a_w = D_w + \max(0, F_w) \\
a_e = D_e + \max(0, -F_e) \\
a_s = D_s + \max(0, F_s) \\
a_n = D_n + \max(0, -F_n) \\
a_T = D_T + \max(0, F_T) \\
a_B = D_B + \max(0, -F_B) \\
a_p^0 = \rho_p^0 \dfrac{\Delta V}{\Delta t} \\
b = S_C \Delta V + a_p^0 + \phi_p^0
\end{cases}
\tag{1-70}
$$

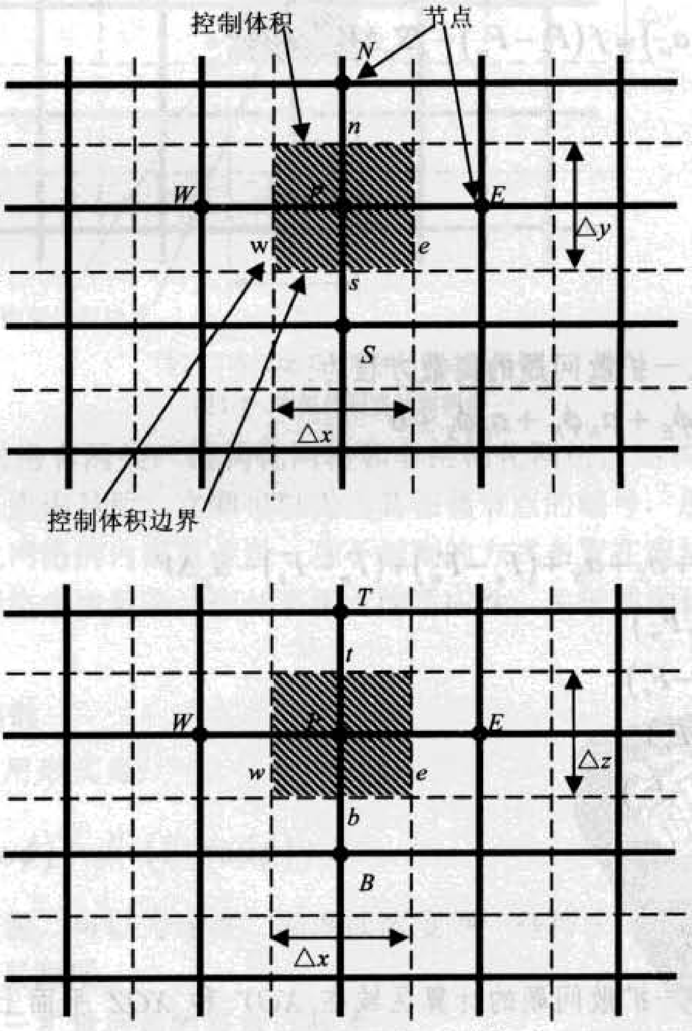


图1-8　三维问题的有限体积法计算网格

三、常用的离散格式

使用有限体积法建立离散方程时，重要的一步是将控制体积界面上的物理量及其导数通过节点物理量插值求出。引入插值方式的目的是为了建立离散方程，不同的插值方式对应于

不同的离散结果，因此，插值方式常称为离散格式。有限体积法常用的离散格式有：中心差分格式、一阶迎风格式、混合格式、指数格式、乘方格式、二阶迎风格式、QUICK 格式。

各种离散格式对一维、稳态、无源项的对流—扩散问题离散可得：

$$a_p\phi_p = a_w\phi_w + a_E\phi_E \tag{1-71}$$

而高阶问题可得：

$$a_p\phi_p = a_w\phi_w + a_{ww}\phi_{ww} + a_E\phi_E + a_{EE}\phi_{EE} \tag{1-72}$$

式中，a_p取值取决于问题的阶数，对于一阶问题，$a_p = a_w + a_E + (F_e - F_w)$，对于二阶问题，$a_p = a_w + a_E + a_{ww} + a_{EE} + (F_e - F_w)$，其中 a_w、a_{ww}、a_E、a_{EE}取决于所使用的离散格式，如表 1-1 所示。

表1-1　　不同离散格式下系数 a_w、a_{ww}、a_E、a_{EE} 的计算公式

离散格式	系数 a_w、a_{ww}	系数 a_E、a_{EE}
中心差分格式	$a_w = D_w + \frac{F_w}{2}$	$a_E = D_e - \frac{F_e}{2}$
一阶迎风格式	$a_w = D_w + \max(0, F_w)$	$a_e = D_e + \max(0, -F_e)$
混合格式	$a_w = \max\left[F_w, \left(D_w + \frac{F_w}{2}\right), 0\right]$	$a_E = \max\left[-F_e, \left(D_e - \frac{F_e}{2}\right), 0\right]$
指数格式	$a_w = \frac{F_w \exp(F_w / D_w)}{\exp(F_w / D_w) - 1}$	$a_E = \frac{F_e}{\exp(F_e / D_e) - 1}$
乘方格式	$a_w = D_w \max\left[0, (1 - 0.1\lvert P_e\rvert)^5\right] + \max[F_w, 0]$	$a_E = D_e \max\left[0, (1 - 0.1\lvert P_e\rvert)^5\right] + \max[-F_e, 0]$
二阶迎风格式	$a_w = D_w + \frac{3}{2}\alpha F_w + \frac{1}{2}\alpha F_e$ $a_{ww} = -\frac{1}{2}\alpha F_w$	$a_e = D_e - \frac{3}{2}(1-\alpha) F_e - \frac{1}{2}(1-\alpha) F_w$ $a_{ww} = \frac{1}{2}(1-\alpha) F_e$
QUICK 格式	$a_w = D_w + \frac{6}{8}\alpha_w F_w + \frac{1}{8}\alpha_w F_e + \frac{3}{8}(1-\alpha_w) F_w$ $a_{ww} = -\frac{1}{8}\alpha_w F_w$	$a_E = D_e - \frac{3}{8}\alpha_e F_e - \frac{6}{8}(1-\alpha_e) F_e - \frac{1}{8}(1-\alpha_e) F_w$ $a_{EE} = \frac{1}{8}(1-\alpha_e) F_e$

对于任何一种离散格式，用户都希望其既具有稳定性，又具有较高的精度，同时又能适应于不同的流动形式，但是实际上这种理想的离散格式是不存在的。下面对离散格式进行粗略的对比，方便用户实际计算时选用，如表 1-2 所示。

表1-2 常见离散格式的性能对比

离散格式	稳定性及稳定条件	精度及经济性
中心差分格式	条件稳定 $P_e \le 2$	在不发生振荡的参数范围内，可以获得较准确的结果
一阶迎风格式	绝对稳定	虽然可以获得物理上可接受的解，但当 P_e 数较大时，假扩散较严重。为避免此问题，常需要加密计算网格
混合格式	绝对稳定	当 $P_e \le 2$ 时，性能与中心差分格式相同；当 $P_e > 2$ 时，性能与一阶迎风格式相同
指数格式	绝对稳定	主要适用于无源项的对流-扩散问题。对有非常数源项的场合，当 P_e 数较高时有较大误差
乘方格式	绝对稳定	与指数格式相同
二阶迎风格式	绝对稳定	精度较一阶迎风格式高，但仍有假扩散问题
QUICK 格式	条件稳定 $P_e \le 8/3$	可以减少假扩散误差，精度较高，应用较广泛。但主要用于六面体或四边形网格
改进的 QUICK 格式	绝对稳定	性能与 QUICK 格式相同，只是不存在稳定性问题

1.3.3 流场迭代求解方法

流场计算的基本过程是在空间上用有限体积法或其他类似方法将计算区域离散成许多小的体积单元，在每个体积单元上对离散后的控制方程组进行求解。上面已经建立了与控制方程相应的离散方程，即代数方程组。但是，除了如已知速度场求温度场这类简单的问题之外，所生成的离散方程不能直接用来求解，还必须对离散方程进行某种调整，并且对各未知量（压力、速度、温度等）的求解顺序及方式进行特殊处理。流场数值计算是针对常规解法存在的主要问题进行改善而形成的一系列方法集，其本质是对离散后的控制方程进行求解，可分为分离式解法和耦合式解法两大类，如图 1-9 所示。

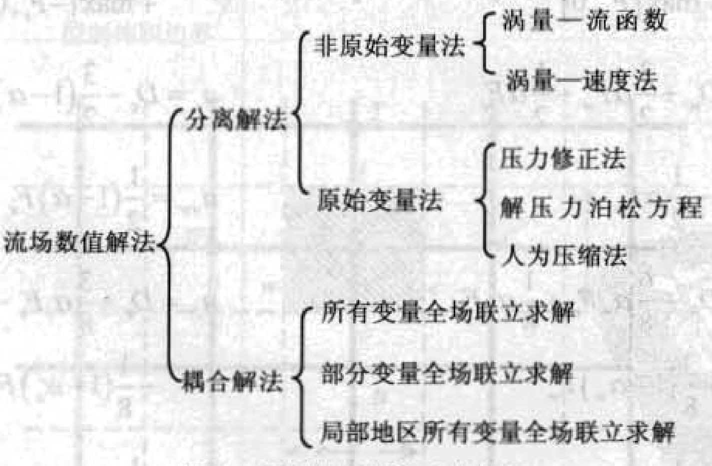


图1-9 流场数值计算方法的分类

分离式解法不直接解联立方程组，而是顺序地、逐个地求解各变量代数方程组。

依据是否直接求解原始变量，分离式解法可分为非原始变量法和原始变量法。

涡量—速度法和涡量—流函数法是两种典型的非原始变量法。涡量—速度法不直接求解流场的原始变量 p，而是求解旋度 ϖ 和速度 u。涡量—流函数法不直接求解原始变量 u 和 p，而是求解旋度 ϖ 和流函数 ψ。

常用的原始变量法有压力修正法、解压力泊松方程法和人为压缩法。解压力泊松方程法需要采用对方程取散度等方法将动量方程转变为泊松方程，然后求解泊松方程。人为压缩法主要是受可压气体可以通过联立求解速度分量和密度的方法来求解的启发，引入人为压缩性和人为状态方程，以此对不可压缩流体的连续性方程施加干扰。目前工程上使用最广泛的流场计算方法是压力修正法，其实质是迭代法。压力修正法有很多实现方式，其中，压力耦合方程组的半隐式方法（SIMPLE 算法）应用最为广泛，也是各商用 CFD 软件普遍采用的方法。

耦合式解法则同时求解离散化的控制方程组，联立求解各变量。耦合式解法可以分为所有变量整场联立求解（隐式解法）、部分变量整场联立求解（显隐式解法）、在局部地区（如一个单元上）对所有变量联立求解（显式解法）。总体而言，耦合式解法计算效率低、内存消耗大。

下面详细介绍几种数值计算常用的流场迭代求解方法。

一、SIMPLE 算法

SIMPLE 算法基于交错网格，所谓交错网格是指将速度分量和压力在不同的网格系统上离散，如压力、温度和密度等在正常的网格节点上存储和计算，而将速度的分量分别在错位后的网格上存储和计算，错位后网格的中心位于原控制体积的界面上。二维流动计算的交错网格如图 1-10 所示，有 3 套不同的网格系统。对于三维问题，则有 4 套网格系统，在此不再详述。

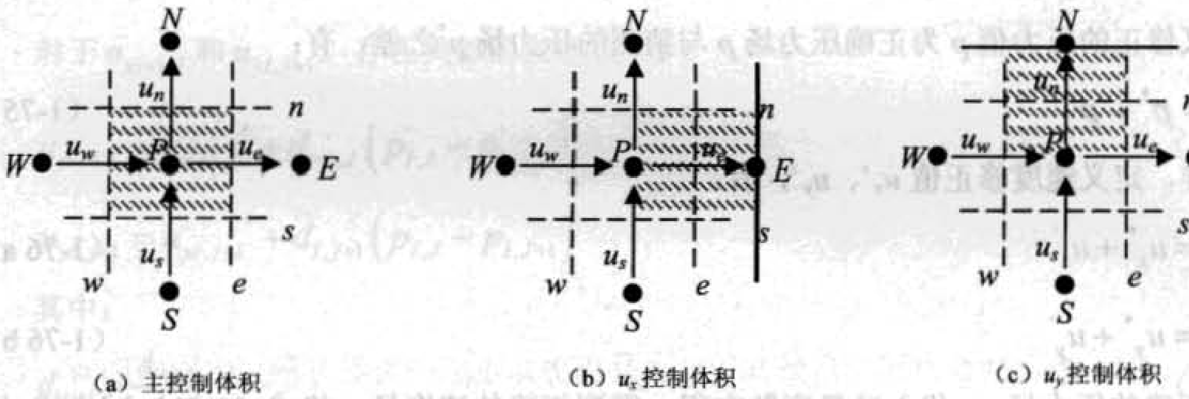


图1-10　二维流动计算的交错网格

SIMPLE 算法由 Patankar 与 Spalding 于 1972 年提出，是一种主要用于求解不可压缩流场的数值方法（也可用于求解可压流动）。它的核心是采用“猜测—修正”的过程，在交错网格的基础上来计算压力场，从而达到求解动量方程的目的。其基本思路可描述如下：对于给定的压力场（它可以是假定的值，或是上一次迭代计算所得到的结果），求解离散形式的动量方程，得出速度场；因为压力场是假定的或不精确的，由此得到的速度场一般不满足连续性方程，因此，必须对给定的压力场加以修正；修正的原则是：与修正后的压力场相应的速度场能满足这一迭代层次上的连续性方程。据此原则，我们把由动量方程的离散形式所规定的压力与速度的关系代入连续方程的离散格式，从而得到压力修正方程，由压力修正方程得出压力修正值；接着，根据修正后的压力场，求得新的速度场；然后检查速度场是否收敛；若不收敛，用修正后的压力值作给定的压力场，开始下一层次的计算；如此反复，直到

获得收敛的解。

在上述求解过程中，如何获得压力修正值（即如何构造压力修正方程），以及如何根据压力修正值确定“正确”的速度（即如何构造速度修正方程），是 SIMPLE 算法的两个关键问题。

(1) 速度修正方程。

针对直角坐标系下的二维层流稳态问题进行介绍，设有初始的猜测压力场 p^*，则动量方程的离散方程可借助该压力场得以求解，从而求出相应的速度分量 u_x^*和 u_y^*。

动量方程的离散方程为：

$$a_{i,J}u_{xi,J}=\sum a_{nb}u_{xnb}+\left(p_{I-1,J}-p_{I,J}\right)A_{i,J}+b_{i,J} \tag{1-73 a}$$

$$a_{I,j}u_{yI,j}=\sum a_{nb}u_{ynb}+\left(p_{I,J-1}-p_{I,J}\right)A_{I,j}+b_{I,j} \tag{1-73 b}$$

式中，A 为控制体积的界面面积，对于二维问题，即为Δx 或Δy；b 为动量方程的源项。

将猜测压力场代入得：

$$a_{i,J}u^*_{xi,J}=\sum a_{nb}u^*_{xnb}+\left(p^*_{I-1,J}-p^*_{I,J}\right)A_{i,J}+b_{i,J} \tag{1-74 a}$$

$$a_{I,j}u^*_{yI,j}=\sum a_{nb}u^*_{ynb}+\left(p^*_{I,J-1}-p^*_{I,J}\right)A_{I,j}+b_{I,j} \tag{1-74 b}$$

定义修正的压力值 p' 为正确压力场 p 与猜测的压力场 p^*之差，有：

$$p=p^*+p' \tag{1-75}$$

同样，定义速度修正值 u_x'、u_y'，有：

$$u_x=u_x^*+u_x' \tag{1-76 a}$$

$$u_y=u_y^*+u_y' \tag{1-76 b}$$

将正确的压力场 p 代入动量离散方程，得到正确的速度场。将式（1-73）减去式（1-74），并假定源项 b 不变，有：

$$a_{i,J}\left(u_{xi,J}-u^*_{xi,J}\right)=\sum a_{nb}\left(u_{xnb}-u^*_{xnb}\right)+\left[\left(p_{I-1,J}-p^*_{I-1,J}\right)-\left(p_{I,J}-p^*_{I,J}\right)\right]A_{i,J} \tag{1-77 a}$$

$$a_{I,j}\left(u_{yI,j}-u^*_{yI,j}\right)=\sum a_{nb}\left(u_{ynb}-u^*_{ynb}\right)+\left[\left(p_{I,J-1}-p^*_{I,J-1}\right)-\left(p_{I,J}-p^*_{I,J}\right)\right]A_{I,j} \tag{1-77 b}$$

引入压力修正值和速度修正值，则式（1-77）化为：

$$a_{i,J}u'_{xi,J}=\sum a_{nb}u'_{xnb}+\left(p'_{I-1,J}-p'_{I,J}\right)A_{i,J} \tag{1-78 a}$$

$$a_{I,j}u'_{yI,j}=\sum a_{nb}u'_{ynb}+\left(p'_{I,J-1}-p'_{I,J}\right)A_{I,j} \tag{1-78 b}$$

由上式，可以通过压力修正值求出速度修正值。式中表明，任一点上速度的修正值由两

部分组成，一部分是与该速度在同一方向上的相邻两节点间压力修正值之差，这是产生速度修正值的直接动力；另一部分是由邻点速度的修正值所引起的，这又可以视为四周压力的修正值对所讨论位置上速度改进的间接影响。

为简化式（1-78）的求解过程，可引入如下近似处理，即略去方程中与速度修正值相关的$\sum a_{nb}u'_{xnb}$和$\sum a_{nb}u'_{ynb}$，该近似是 SIMPLE 算法的重要特征，于是有：

$$u'_{xi,J}=d_{i,J}\left(p'_{I-1,J}-p'_{I,J}\right) \tag{1-79 a}$$

$$u'_{yI,j}=d_{I,j}\left(p'_{I,J-1}-p'_{I,J}\right) \tag{1-79 b}$$

其中：

$$d_{i,J}=\frac{A_{i,J}}{a_{i,J}} \tag{1-80 a}$$

$$d_{I,j}=\frac{A_{I,j}}{a_{I,j}} \tag{1-80 b}$$

将式（1-79）所示的速度修正值代入式（1-76），有：

$$u_{xi,J}=u_{xi,J}^{*}+d_{i,J}\left(p'_{I-1,J}-p'_{I,J}\right) \tag{1-81 a}$$

$$u_{yI,j}=u_{yI,j}^{*}+d_{I,j}\left(p'_{I,J-1}-p'_{I,J}\right) \tag{1-81 b}$$

对于$u_{xi+1,J}$和$u_{yI,j+1}$，存在类似的表达式为：

$$u_{xi+1,J}=u_{xi+1,J}^{*}+d_{i+1,J}\left(p'_{I,J}-p'_{I+1,J}\right) \tag{1-82 a}$$

$$u_{yI,j+1}=u_{yI,j+1}^{*}+d_{I,j+1}\left(p'_{I,J}-p'_{I,J+1}\right) \tag{1-82 b}$$

其中：

$$d_{i+1,J}=\frac{A_{i+1,J}}{a_{i+1,J}} \tag{1-83 a}$$

$$d_{I,j+1}=\frac{A_{I,j+1}}{a_{I,j+1}} \tag{1-83 b}$$

式（1-81）和式（1-82）表明，如果已知压力修正值，便可对猜测的速度场作出相应的速度修正，从而得到正确的速度场。

(2) 压力修正方程。

在速度修正方程的推导中，只考虑了动量方程，其实，如前所述，速度场还受到连续性方程的约束。这里针对二维稳态问题进行分析，其连续性方程为：

$$\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y}=0 \tag{1-84}$$

对图 1-11 所示的标量控制体积，连续性方程满足如下离散形式：

$$\left[(\rho u_x A)_{i+1,J}-(\rho u_x A)_{i,J}\right]+\left[(\rho u_y A)_{I,j+1}-(\rho u_y A)_{I,j}\right]=0 \tag{1-85}$$

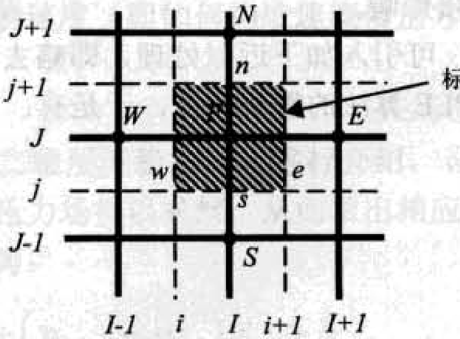


图1-11　用于离散连续性方程的标量控制体积

将正确的速度值代入式（1-85），有：

$$\begin{aligned}&\left\{\rho_{i+1,J}A_{i+1,J}\left[u^{*}_{xi+1,J}+d_{i+1,J}\left(p'_{I,J}-p'_{I+1,J}\right)\right]-\rho_{i,J}A_{i,J}\left[u^{*}_{xi,J}+d_{i,J}\left(p'_{I-1,J}-p'_{I,J}\right)\right]\right\}\\&+\left\{\rho_{I,j+1}A_{I,j+1}\left[u^{*}_{yI,j+1}+d_{I,j+1}\left(p'_{I,J}-p'_{I,J+1}\right)\right]-\rho_{I,j}A_{I,j}\left[u^{*}_{yI,j}+d_{I,j}\left(p'_{I,J-1}-p'_{I,J}\right)\right]\right\}=0\end{aligned} \tag{1-86}$$

该式可简记为：

$$a_{I,J}p'_{I,J}=a_{I+1,J}p'_{I+1,J}+a_{I-1,J}p'_{I-1,J}+a_{I,J+1}p'_{I,J+1}+a_{I,J-1}p'_{I,J-1}+b'_{I,J} \tag{1-87}$$

其中：

$$\begin{cases}a_{I+1,J}=(\rho dA)_{i+1,J}\\a_{I-1,J}=(\rho dA)_{i,J}\\a_{I,J+1}=(\rho dA)_{I,j+1}\\a_{I,J-1}=(\rho dA)_{I,j}\\a_{I,J}=a_{I+1,J}+a_{I-1,J}+a_{I,J+1}+a_{I,J-1}\\b'_{I,J}=(\rho u_x^{*}A)_{i,J}-(\rho u_x^{*}A)_{i+1,J}+(\rho u_y^{*}A)_{I,j}-(\rho u_y^{*}A)_{I,j+1}\end{cases} \tag{1-88}$$

式（1-87）为连续性方程的离散方程，也是压力修正值的离散方程。方程中的源项是由于不正确的速度场所导致的“连续性”不平衡量。通过求解式（1-87），可得到空间所有位置的压力修正值。

式（1-88）中的密度是标量控制体积界面上的密度值，需要通过插值得到。无论采用何种插值方法，对于交界面所属的两个控制体积，必须采用同样的密度值。

为了求解式（1-87），还必须对压力修正值的边界条件进行说明。由于压力修正方程是动量方程和连续性方程的派生物，不是基本方程，故其边界条件也与动量方程的边界条件有关。在一般的流场计算中，动量方程的边界条件有两类：一种是已知边界上的压力；另一种是已知沿边界法向的速度分量。若为第一种边界，知边界压力 $\overline{p}$，可以令 $p^{*}=\overline{p}$，则压力修正值 p' 应为零；若为第二种边界，知边界上的法向速度，在网格设计时令控制体积的界面与边界一致，这样，控制体积界面上的速度就为已知条件了。

(3) SIMPLE 算法的计算，如图 1-12 所示。

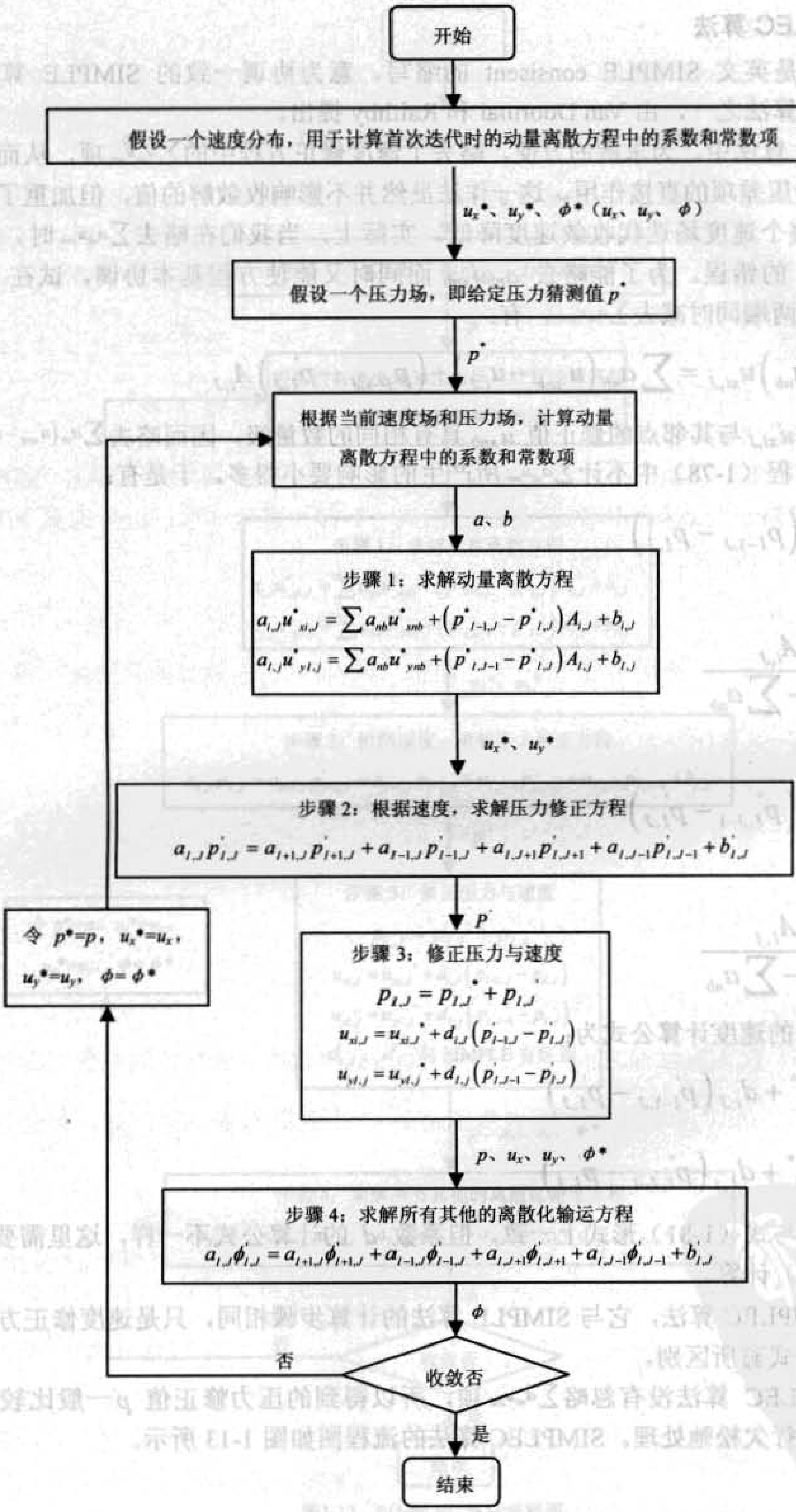


图1-12 SIMPLE 算法流程图

二、SIMPLEC 算法

SIMPLEC 是英文 SIMPLE consisent 的缩写，意为协调一致的 SIMPLE 算法。它是 SIMPLE 的改进算法之一，由 Van Doormal 和 Raithby 提出。

在 SIMPLE 算法中，为求解的方便，略去了速度修正方程中的$\sum a_{nb}u'_{xnb}$项，从而把速度的修正完全归结于压差项的直接作用。这一作法虽然并不影响收敛解的值，但加重了修正值 p' 的负担，使得整个速度场迭代收敛速度降低。实际上，当我们在略去$\sum a_{nb}u'_{xnb}$时，犯了一个"不协调一致"的错误。为了能略去 $a_{nb}u'_{xnb}$ 而同时又能使方程基本协调，试在 $u'_{xi,J}$ 方程（1-78）的等号两端同时减去$\sum a_{nb}u'_{xi,J}$，有：

$$\left(a_{i,J}-\sum a_{nb}\right)u'_{xi,J}=\sum a_{nb}\left(u'_{xnb}-u'_{i,J}\right)+\left(p'_{I-1,J}-p'_{I,J}\right)A_{i,J} \tag{1-89}$$

可以预期，$u'_{xi,J}$ 与其邻点的修正值 u'_{xnb} 具有相同的数量级，因而略去$\sum a_{nb}\left(u'_{xnb}-u'_{i,J}\right)$所产生的影响远比在方程（1-78）中不计$\sum a_{nb}u'_{xnb}$所产生的影响要小得多。于是有：

$$u'_{xi,J}=d_{i,J}\left(p'_{I-1,J}-p'_{I,J}\right) \tag{1-90}$$

其中：

$$d_{i,J}=\frac{A_{i,J}}{a_{i,J}-\sum a_{nb}} \tag{1-91}$$

同理，有：

$$u'_{yI,j}=d_{I,j}\left(p'_{I,J-1}-p'_{I,J}\right) \tag{1-92}$$

其中：

$$d_{I,j}=\frac{A_{I,j}}{a_{I,j}-\sum a_{nb}} \tag{1-93}$$

得出修正后的速度计算公式为：

$$u_{xi,J}=u_{xi,J}^{*}+d_{i,J}\left(p'_{I-1,J}-p'_{I,J}\right) \tag{1-94 a}$$

$$u_{yI,j}=u_{yI,j}^{*}+d_{I,j}\left(p'_{I,J-1}-p'_{I,J}\right) \tag{1-94 b}$$

式（1-94）与式（1-81）形式上一致，但系数 d 的计算公式不一样，这里需要用式（1-91）和式（1-93）计算。

这就是 SIMPLEC 算法，它与 SIMPLE 算法的计算步骤相同，只是速度修正方程中的系数项 d 的计算公式有所区别。

由于 SIMPLEC 算法没有忽略$\sum a_{nb}u'_{xnb}$项，所以得到的压力修正值 p'一般比较合适。因此，可不对 p'进行欠松弛处理。SIMPLEC 算法的流程图如图 1-13 所示。

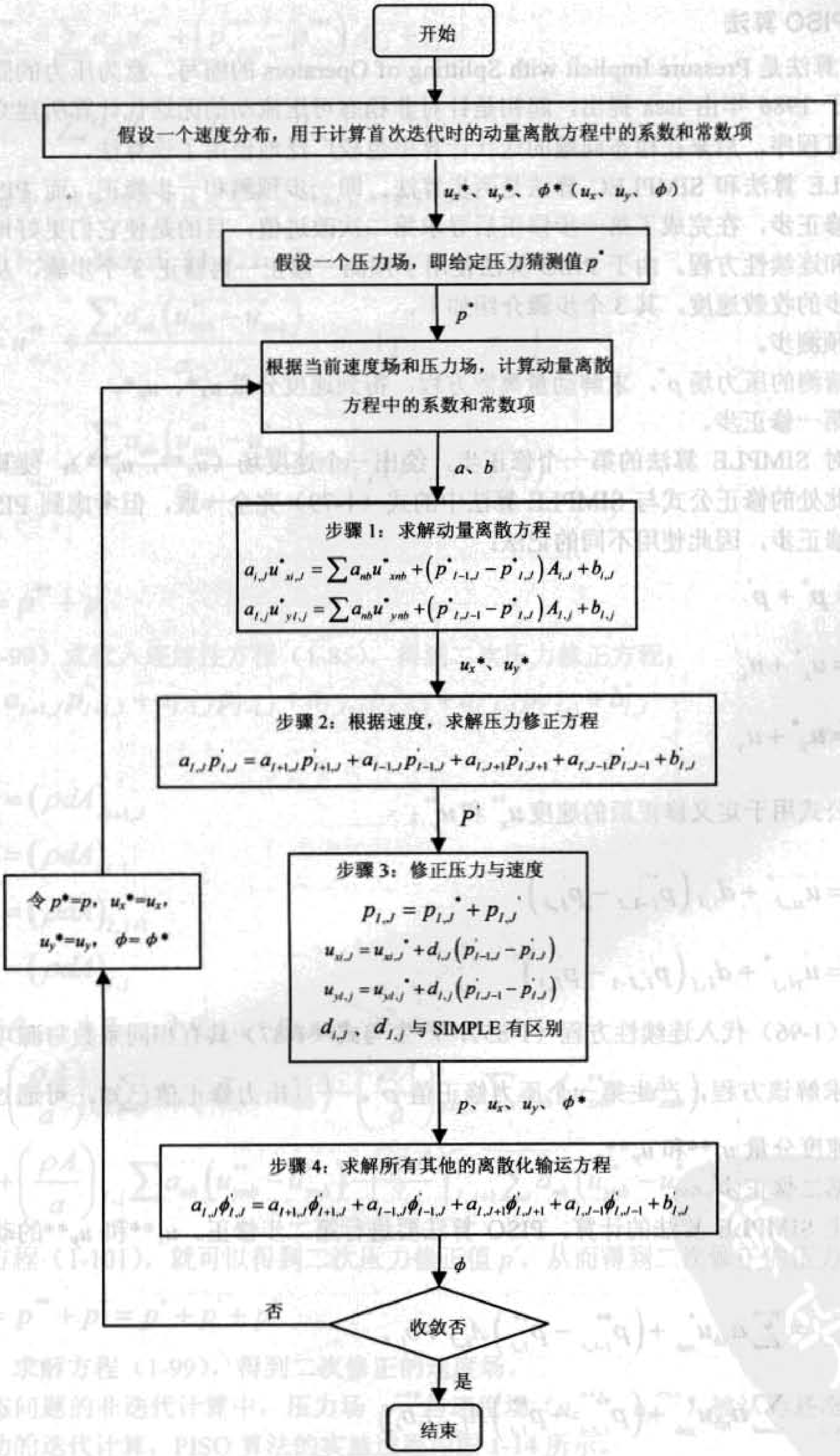


图1-13 SIMPLEC 算法流程图

三、PISO 算法

PISO 算法是 Pressure Implicit with Splitting of Operators 的缩写，意为压力的隐式算子分割算法，于 1986 年由 Issa 提出，起初是针对非稳态可压流动的无迭代计算所建立的一种压力速度计算程序，后来在稳态问题的迭代计算中也较广泛地使用了该算法。

SIMPLE 算法和 SIMPLEC 算法是两步算法，即一步预测和一步修正，而 PISO 算法增加了一个修正步，在完成了第一步修正后寻求第二次改进值，目的是使它们更好地同时满足动量方程和连续性方程。由于 PISO 算法使用了预测—修正—再修正 3 个步骤，从而加快了单个迭代步的收敛速度，其 3 个步骤介绍如下。

(1) 预测步。

利用猜测的压力场 p^*，求解动量离散方程，得到速度分量 u_x*、u_y*。

(2) 第一修正步。

引入对 SIMPLE 算法的第一个修正步，给出一个速度场（u_x**，u_y**），使其满足连续性方程。此处的修正公式与 SIMPLE 算法中的式（1-79）完全一致，但考虑到 PISO 算法还有第二个修正步，因此使用不同的记法：

$$p^{**} = p^* + p' \tag{1-95 a}$$

$$u_x^{**} = u_x^* + u_x' \tag{1-95 b}$$

$$u_y^{**} = u_y^* + u_y' \tag{1-95 c}$$

这组公式用于定义修正后的速度 u_x^{**} 和 u_y^{**}：

$$u_{xi,J}^{**} = u_{xi,J}^* + d_{i,J}\left(p'_{I-1,J} - p'_{I,J}\right) \tag{1-96 a}$$

$$u_{yI,j}^{**} = u_{yI,j}^* + d_{I,j}\left(p'_{I,J-1} - p'_{I,J}\right) \tag{1-96 b}$$

将式（1-96）代入连续性方程（1-85），产生与式（1-87）具有相同系数与源项的压力修正方程。求解该方程，产生第一个压力修正值 p'。一旦压力修正值已知，可通过方程（1-96）获得速度分量 u_x**和 u_y**。

(3) 第二修正步。

为强化 SIMPLE 算法的计算，PISO 算法要进行第二步修正。u_x**和 u_y**的动量离散方程是：

$$a_{i,J}u_{xi,J}^{**} = \sum a_{nb}u_{xnb}^{*} + \left(p_{I-1,J}^{**} - p_{I,J}^{**}\right)A_{i,J} + b_{i,J} \tag{1-97 a}$$

$$a_{I,j}u_{yI,j}^{**} = \sum a_{nb}u_{ynb}^{*} + \left(p_{I,J-1}^{**} - p_{I,J}^{**}\right)A_{I,j} + b_{I,j} \tag{1-97 b}$$

再次求解动量方程，得出两次修正的速度场：

$$a_{i,J}u_{xi,J}^{***}=\sum a_{nb}u_{xnb}^{**}+\left(p_{I-1,J}^{***}-p_{I,J}^{***}\right)A_{i,J}+b_{i,J} \quad (1\text{-}98\ \text{a})$$

$$a_{I,j}u_{yI,j}^{***}=\sum a_{nb}u_{ynb}^{**}+\left(p_{I,J-1}^{***}-p_{I,J}^{***}\right)A_{I,j}+b_{I,j} \quad (1\text{-}98\ \text{b})$$

注意：修正步中的求和项是用速度分量 u_x^{**} 和 u_y^{**} 来计算的。

将式（1-98）减去式（1-97），得：

$$u_{xi,J}^{***}=u_{xi,J}^{**}+\frac{\sum a_{nb}\left(u_{xnb}^{**}-u_{xnb}^{*}\right)}{a_{i,J}}+d_{i,J}\left(p''_{I-1,J}-p''_{I,J}\right) \quad (1\text{-}99\ \text{a})$$

$$u_{yI,j}^{***}=u_{yI,j}^{**}+\frac{\sum a_{nb}\left(u_{ynb}^{**}-u_{ynb}^{*}\right)}{a_{I,j}}+d_{I,j}\left(p''_{I,J-1}-p''_{I,J}\right) \quad (1\text{-}99\ \text{b})$$

其中：

$$p^{***}=p^{**}+p'' \quad (1\text{-}100)$$

将（1-99）式代入连续性方程（1-85），得到二次压力修正方程：

$$a_{I,J}p''_{I,J}=a_{I+1,J}p''_{I+1,J}+a_{I-1,J}p''_{I-1,J}+a_{I,J+1}p''_{I,J+1}+a_{I,J-1}p''_{I,J-1}+b''_{I,J} \quad (1\text{-}101)$$

其中：

$$\begin{cases} a_{I+1,J}=\left(\rho dA\right)_{i+1,J} \\ a_{I-1,J}=\left(\rho dA\right)_{i,J} \\ a_{I,J+1}=\left(\rho dA\right)_{I,j+1} \\ a_{I,J-1}=\left(\rho dA\right)_{I,j} \\ a_{I,J}=a_{I+1,J}+a_{I-1,J}+a_{I,J+1}+a_{I,J-1} \\ b''_{I,J}=\left(\dfrac{\rho A}{a}\right)_{i,J}\sum a_{nb}\left(u_{xnb}^{**}-u_{xnb}^{*}\right)-\left(\dfrac{\rho A}{a}\right)_{i+1,J}\sum a_{nb}\left(u_{xnb}^{**}-u_{xnb}^{*}\right) \\ \qquad +\left(\dfrac{\rho A}{a}\right)_{I,j}\sum a_{nb}\left(u_{ynb}^{**}-u_{ynb}^{*}\right)-\left(\dfrac{\rho A}{a}\right)_{I,j+1}\sum a_{nb}\left(u_{ynb}^{**}-u_{ynb}^{*}\right) \end{cases} \quad (1\text{-}102)$$

求解方程（1-101），就可以得到二次压力修正值 p''，从而得到二次修正的压力场：

$$p^{***}=p^{**}+p''=p^{*}+p'+p'' \quad (1\text{-}103)$$

最后，求解方程（1-99），得到二次修正的速度场。

在瞬态问题的非迭代计算中，压力场 p^{***} 与速度场（u_x^{***}，u_y^{***}）被认为是准确的。对于稳态流动的迭代计算，PISO 算法的实施过程如图 1-14 所示。

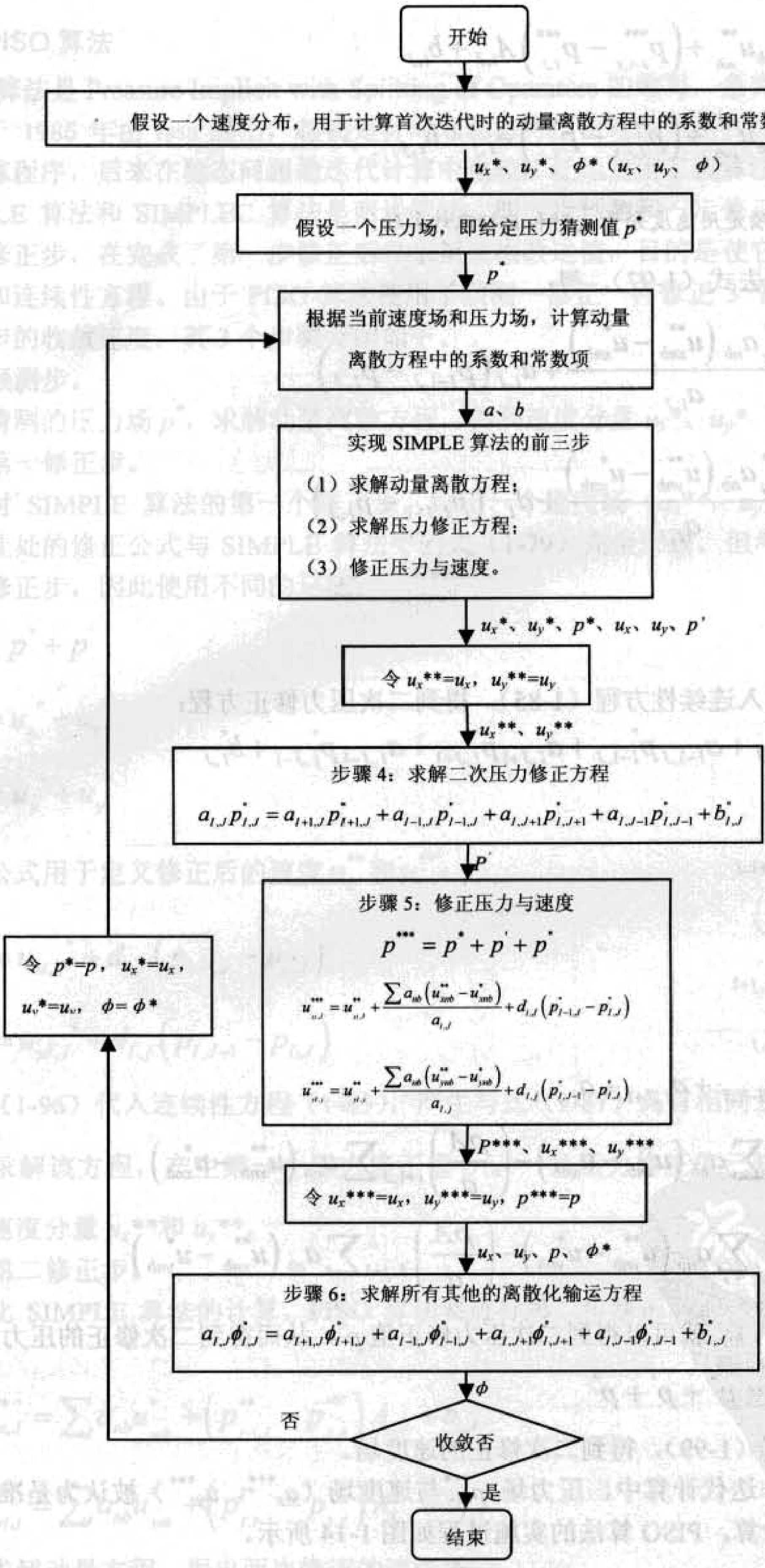


图1-14　PISO 算法流程图

PISO 算法要两次求解压力修正方程，因此，它需要额外的存储空间来计算二次压力修正方程中的源项。尽管该方法涉及较多的计算，但对比发现，它的计算速度很快，总体效率比较高。FLUENT 的用户手册推荐，对于瞬态问题，PISO 算法有明显的优势；而对于稳态问题，可能选 SIMPLE 或 SIMPLEC 算法更合适。

SIMPLE 算法是 SIMPLE 系列算法的基础。目前在各种 CFD 软件中均提供了这种算法。SIMPLE 的各种改进算法主要是提高了计算的收敛性，从而缩短计算时间。

在 SIMPLE 算法中，压力修正值 p' 能够很好地满足速度修正的要求，但对压力修正不是很理想。SIMPLEC 和 PISO 算法总体上计算量要高出 SIMPLE 算法 30%左右，收敛速度较 SIMPLE 算法快 30%～50%。但对于不同类型的问题而言，每种算法有各自的优势。一般而言，动量方程与标量方程如果不是耦合在一起的，用 PISO 算法能够较好地收敛，且体现出较高的计算效率。而在动量方程与标量方程耦合非常密切时，SIMPLEC 算法的效果可能更好些。

1.4 本章小结

本章主要讲述了计算流体力学的基本理论、基本方程及 FLUENT 软件所涉及到的数值计算方法，包括区域的离散、迭代求解方法等。通过本章基本理论知识的讲述，帮助读者了解计算流体力学的求解思路，掌握 CFD 计算方法及 FLUENT 原理，为后续 FLUENT 的使用打下基础。

备忘录

- 流体的粘性是区别于固体的主要性质之一。
- 计算流体力学的连续性方程、动量方程和能量方程是最主要的基本方程。
- FLUENT 基于有限体积法，流场迭代求解的方法主要有 SIMPLE 算法、SIMPLEC 算法和 PISO 算法等。

第 2 章 流体流动分析概述

任何流体运动都必须遵循质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律。这些基本定律可用数学方程组来描述，如欧拉方程、N-S 方程等。建立这些描述流体流动方程的方法为理论分析方法，它是最早的流体流动分析法。然而，此方法往往要求对计算对象进行抽象和简化，才能得出理论解，所以对于复杂流动问题很难得到精确解；借助物理模型进行流体流动相关物理参数的实验量测是后来发展而成的实验研究方法，然而，此方法又过分依赖于实验环境，且常受到模型尺寸和人为因素的影响，得出的结果与实际存在一定的差距；采用数值计算方法，通过计算机求解控制流体流动的数学方程，进而研究流体的运动规律，这就是近年来发展如火如荼的计算流体动力学方法。

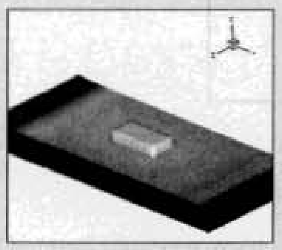
本章主要介绍流体流动分析的发展，涉及 CFD 的概念、CFD 软件及流动分析的应用领域，重点介绍 CFD 软件中运用最为广泛的 FLUENT 软件。通过 FLUENT 软件的功能、运行方法、用户界面及一个简单实例的演示，帮助读者在了解第 1 章的计算流体动力学基本理论的基础之上，掌握 FLUENT 软件的基本操作，并学会分析简单流体流动问题。

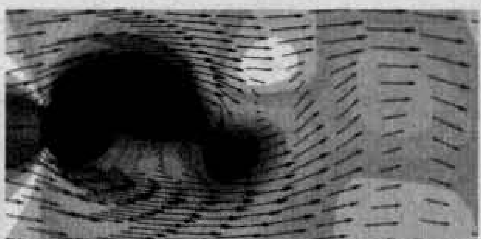
本章要点

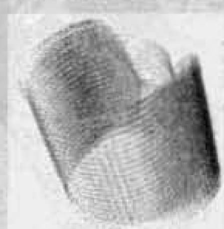
- CFD 的概念及相关应用软件。
- 流动分析的应用领域。
- FLUENT 软件版本及运行方法。
- FLUENT 与其他软件的数据交换。
- FLUENT 的用户界面及其操作。
- FLUENT 入门操作实例。

本章案例

- 二维三通管内流体的流动分析。







2.1 流动分析的发展

早期对流体流动现象的分析主要依靠理论分析研究，但由于方程未知数的个数常大于方程数，需要对计算对象进行抽象和简化，致使理论分析发展缓慢；随后，人们转向于实验研究，然而诸多流动问题相当复杂，涉及的外在环境因素颇多，且所建立的模型往往涉及到变态比尺，故实验结果存在较大的误差；随着计算机技术的高速发展，人们开始利用计算机进行复杂流动问题的解算，且在水利、航运、海洋、食品、环境、流体机械及相关流体工程领域已有成功应用。这种利用计算机技术进行流动问题数值求解的方法就是计算流体动力学方法，现已有相关计算流体动力学商业软件问世，过去只能靠实验手段得到的某些结果，现在已完全可以借助数值模拟来准确获取。

2.1.1 CFD 的提出

计算流体动力学（Computational Fluid Dynamics，简称 CFD）是建立在经典流体动力学与数值计算方法基础之上的一门新型独立学科，其基本定义是通过计算机进行数值计算和图像显示，分析包括流体流动和热传导等相关物理现象的系统。它兼有理论性和实践性的双重特点，建立了许多理论和方法，为现代科学中许多复杂流动与传热问题提供了有效的计算技术。

CFD 方法与传统的理论分析方法、实验量测方法组成了研究流体流动问题的完整体系。理论分析方法的优点在于所得结果具有普遍性，各种影响因素清晰可见，是指导实验研究和验证新的数值计算方法的理论基础，但是，它往往要求对计算对象进行抽象和简化，才能得出理论解。对于非线性情况，只有少数流动才能给出解析解。实验测量方法是理论分析和数值方法的基础，其重要性不可低估，然而，实验往往受到模型尺寸、流场扰动、人为因素和测量精度的限制，且还需投入相对较多的经费、人力和物力。CFD 方法很好地克服了理论分析与实验研究的弱点，在计算机上实现一个特定的计算，且可以形象地再现流动情景。

利用 CFD 进行流动和传热现象分析的基本思想是用一系列有限个离散点上的变量值的集合来代替空间域上连续的物理量的场，如速度场和压力场；然后，按照一定的方式建立这些离散点上变量之间关系的代数方程组，通过求解代数方程组获得场变量的近似值。它可以看作是在流动基本方程控制下对流动的数值模拟。通过这种数值模拟，我们可以得到极其复杂问题的流场内各个位置上的基本物理量的分布，以及这些物理量随时间的变化情况，确定漩涡分布特性、空化特性及脱流区等。还可据此算出相关的其他物理量，如旋转式流体机械的转矩、水力损失和效率等。此外，它与 CAD 联合，还可以进行结构优化设计等。

CFD 具有适应性强、应用面广的优点。由于流体问题的控制方程一般是非线性的，自变量多，计算域的几何形状和边界条件复杂，很难求得解析解，只有用 CFD 方法才有可能求得满足工程需要的数值解。另外，CFD 方法不受物理模型和实验模型的限制，省钱省时，有较多的灵活性，能给出详细和完整的数值计算结果，很容易模拟特殊尺寸、高温、有毒、易燃等真实条件和实验中只能接近而无法达到的理想条件。然而，CFD 也存在一定的局限，其数值解法是一种离散近似计算方法，依赖于物理上合理、数学上适用，适合于在计

算机上进行计算的离散的有限数学模型，且最终结果不能提供任何形式的解析表达式，只是有限数量离散点上的数值解，并有一定的计算误差。此外，CFD 软件的应用很大程度上依赖于经验和技巧。

CFD 方法依赖于系统的流体动力学知识和较深入的数理基础，虽然商用 CFD 软件减轻了用户在这方面的压力，但是学习和掌握 CFD 还不是一件容易的事，需要读者在熟悉 CFD 基本理论的基础之上掌握相关软件的模拟功能，在不断的练习和实战中总结经验和技巧。

2.1.2 CFD 软件简介

CFD 的应用与计算机技术的发展密切相关。CFD 软件最早于 20 世纪 70 年代诞生于美国，但近十年才真正得到较广泛的应用。

为了完成 CFD 计算，早期需要用户自己编写计算程序，但由于 CFD 的复杂性及计算机软硬件的多样性，使得用户各自的应用程序往往缺乏通用性，而 CFD 本身又有其鲜明的系统性与规律性，因此，比较适合于被制成通用的商用软件。

自 1981 年以来，出现了如 PHOENICS、CFX、STAR-CD、FIDAP、FLUENT 等多个商用 CFD 软件，且随着计算机技术的进一步快速发展，这些商用软件在工程领域正发挥着越来越大的作用。

- PHOENICS：世界上第一个投放市场的 CFD 商用软件，可以算是 CFD 商用软件的鼻祖。这一软件中所采用的一些基本算法，如 SIMPLE 方法、混合格式等，正是由该软件创始人 D.B. Spalding 及其合作者 S.V. Patankar 等所提出的，对以后开发的商用软件有较大的影响。近年来，PHOENICS 软件在功能上与方法方面做了较大的改进，包括纳入拼片式多网格及细密网格嵌入技术，同位网格及非结构化网格技术；在湍流模型方面开发了通用的零方程、低 Reynolds $k-\varepsilon$ 模型、RNG $k-\varepsilon$ 模型等。应用这一软件可计算大量的实际工作问题，包括城市污染预测、叶轮中的流动、管道流动等。
- CFX：该软件采用有限容积法、拼片式块结构化网络，在非正交曲线坐标（适体坐标）系上进行离散，变量的布置采用同位网格方式。对流项的离散格式包括一阶迎风、混合格式、QUICK、CONDIF、MUSCI 及高阶迎风格式。压力与速度的耦合关系采用 SIMPLE 系列算法（SIMPLEC），代数方程求解的方法中包括线迭代、代数多重网络、ICCG、STONE 强隐方法及块隐式（BIM）。软件可计算不可压缩及可压缩流动、耦合传热、多相流、化学反应、气体燃烧等问题。
- STAR-CD：软件名称是英语 Simulation of Turbulent Flow in Arbitrary Region 的缩写，连字符后的 CD 是开发商 Computational Dynamics Ltd 的简称。这是基于有限容积法的一个通用软件。在网格生成方面，采用非结构化网格，单元的形态可以有六面体、四面体、三角形截面的棱柱体、金字塔形的锥体及六种形状的其他它多面体。应用这一软件可以计算稳态与非稳态流动、牛顿流体及非牛顿流体的流动、多孔介质中的流动、亚音速及超音速流动，并且这一软件在汽车工业中的应用十分广泛。

- FIDAP: 这是英语 Fluid Dynamics Analysis Package 的缩写，于 1983 年由美国 Fluid Dynamics International Inc.推出，是世界上第一个使用有限元法（FEM）的 CFD 软件。可以接受如 I-DEAS、PATRAN、ANSYS 和 ICEMCFD 等著名生成网格的软件所产生的网格。该软件可以计算可压缩及不可压缩流、层流与湍流、单相与两相流、牛顿流体及非牛顿流体的流动问题。
- FLUENT: 这一软件由美国 FLUENT Inc.于 1983 年推出，是继 PHOENICS 软件之后的第二个投放市场的基于有限容积法的软件。它包含有结构化及非结构化网格两个版本。在结构化网格版本中有适体坐标的前处理软件，同时也可以纳入 I-DEAS、PATRAN、ANSYS 和 ICEM-CFD 等著名生成网格的软件所产生的网格。速度与压力耦合采用同位网格上的 SIMPLEC 算法。对流项差分格式纳入了一阶迎风、中心差分及 QUICK 等格式。软件能计算可压缩及不可压缩流动、含有粒子的蒸发、燃烧过程、多组分介质的化学反应过程等问题。

所有的商用 CFD 软件均包括 3 个基本环节，分别为前处理、求解和后处理，与之对应的程序模块常简称前处理器、求解器、后处理器。

(1) 前处理器用于完成前处理工作。前处理环节是向 CFD 软件输入所求问题的相关数据，该过程一般是借助于求解器相对应的对话框等图形界面来完成的。用户需要定义所求问题的几何计算区域，并将计算区域划分成多个互不重叠的子区域，形成由单元组成的网格；然后，对所要研究的物理和化学现象进行抽象，选择相应的控制方程；最后，定义流体的物性参数和初边界条件。目前，商用 CFD 软件数值计算时，超过 50%的时间花在几何区域的定义和计算网格的生成上，我们可以使用 CFD 软件自身的前处理器来生成几何模型，也可以借助其他商用 CFD 或 CAD/CAE 软件提供的几何模型。

注意：在前处理阶段生成计算网格时，关键是要把握好计算精度与计算成本之间的平衡。

(2) 求解器的核心是数值求解算法。常用的数值求解方案包括有限差分、有限元、谱方法和有限体积法等。总体而言，这些方法的求解过程大致相同，都是首先借助简单函数来近似待求解的流动变量，然后将近似关系代入连续型的控制方程中，形成离散方程组，最后求解代数方程组。各种数值求解方案的主要区别在于流动变量被近似的方式及相应的离散化过程。

(3) 后处理器帮助用户对流体计算结果进行观察和分析，包括计算区域的几何模型及网格显示、速度矢量图、各物理量的等值线图/云图、XY 散点图、粒子轨迹图等。借助后处理功能，还可以动态模拟流动效果，直观地了解 CFD 的计算结果。

2.1.3 流动分析的应用领域

随着 CFD 的不断发展，所有涉及流体流动、热交换、分子输运等现象的问题，几乎都可以通过计算流体力学的方法进行分析和模拟。CFD 不仅作为一个研究工具，而且还作为设计工具在水利工程、土木工程、石油工程、天然气工程、环境工程、食品工程、海洋结构

工程、工业园制造等领域发挥作用。典型的应用场合及相关的工程问题包括：

- 水轮机、风机和泵等流体机械内部的流体流动；
- 石油、天然气的地下渗透、开采及储运；
- 飞机和航天飞机等飞行器的设计；
- 汽车流线外形对性能的影响；
- 洪水波及河口潮流计算；
- 流体机械的结构设计与优化；
- 风载荷对大桥、高层建筑物稳定性及结构性能的影响；
- 温室及室内的空气流动及环境分析；
- 电子元器件的冷却；
- 换热器性能分析及换热器片形状的选取；
- 河流中污染物的扩散；
- 汽车尾气对街道环境的污染；
- 食品中细菌的运移。

对这些问题的处理，过去主要借助于基本的理论分析和大量的物理模型实验，而现在大多采用 CFD 的方式加以分析和解决，CFD 技术现已发展到完全可以分析三维粘性湍流及旋涡运动等复杂问题的程度。

CFD 的求解过程包括了建立控制方程、确定边界条件与初始条件、划分计算网格、建立离散方程、离散初始条件和边界条件、给定求解控制参数、求解离散方程、判断解的收敛性、显示和输出计算结果等步骤。为了便于用户将主要的精力集中在基本的物理原理上，目前已经有很多优秀的 CFD 商用软件投入使用。

2.2 FLUENT 软件简介

FLUENT 是目前处于世界领先地位的商业 CFD 软件包之一，在流体建模中被广泛采用，最初由 FLUENT Inc.于 1983 年开始发行。2006 年 2 月 ANSYS Inc.收购 FLUENT Inc.后成为全球最大的 CAE 软件公司。

FLUENT 是一个用于模拟和分析复杂几何区域内的流体流动与传热现象的专用软件，它提供了灵活的网格特性，可以支持多种网格。用户可以自由选择使用非结构化或者结构化网格来划分复杂的集合区域，如针对二维问题支持三角形网格或四边形网格；针对三维问题支持四面体、六面体、棱锥、楔形、多面体网格；同时也支持混合网格。用户也可以利用 FLUENT 提供的网格自适应特性在求解过程中根据所获得的计算结果来优化网格。

FLUENT 以用户界面友好而著称，所以对初学者来说非常容易上手。FLUENT 的软件设计基于 CFD 软件群的思想，从用户需求角度出发，针对各种复杂流动的物理现象，采用不同的离散格式和数值方法，在特定领域内使计算速度、稳定性和精度等方面达到最佳组合，从而高效地解决各个领域的复杂流动计算问题。

FLUENT 的基本程序结构如图 2-1 所示，一般包括以下几个部分。

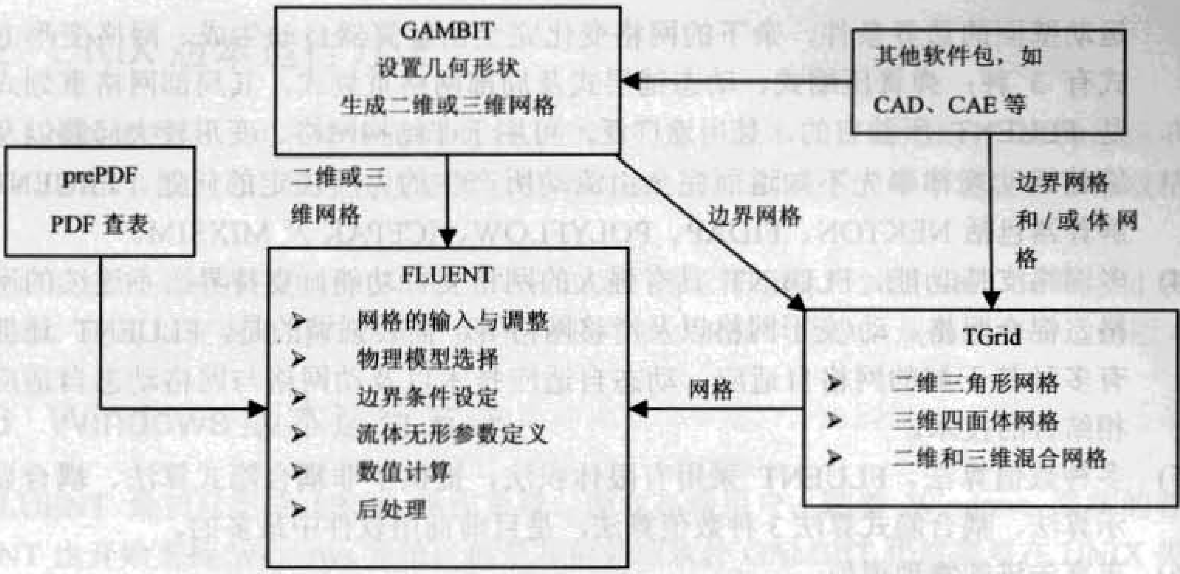


图2-1 FLUENT 程序结构图

- FLUENT，进行模拟计算的求解器；
- prePDF，用于模拟 PDF 燃烧过程；
- GAMBIT，建立几何模型及网格生成；
- Tgrid，用于从现有的边界网格生成体网格；
- Filters，转换其他程序生成的网格，用于 FLUENT 的计算。

可以接口的程序包括 ANSYS、I-DEAS、NASTRAN、PATRAN 等。

2.2.1 FLUENT 软件功能

FLUENT 的功能与特点介绍如下。

(1) 完全非结构化网格。FLUENT 软件采用基于完全非结构化网格的有限体积法，而且具有基于网格节点和网格单元的梯度算法，网格类型较多，如图 2-2 所示。

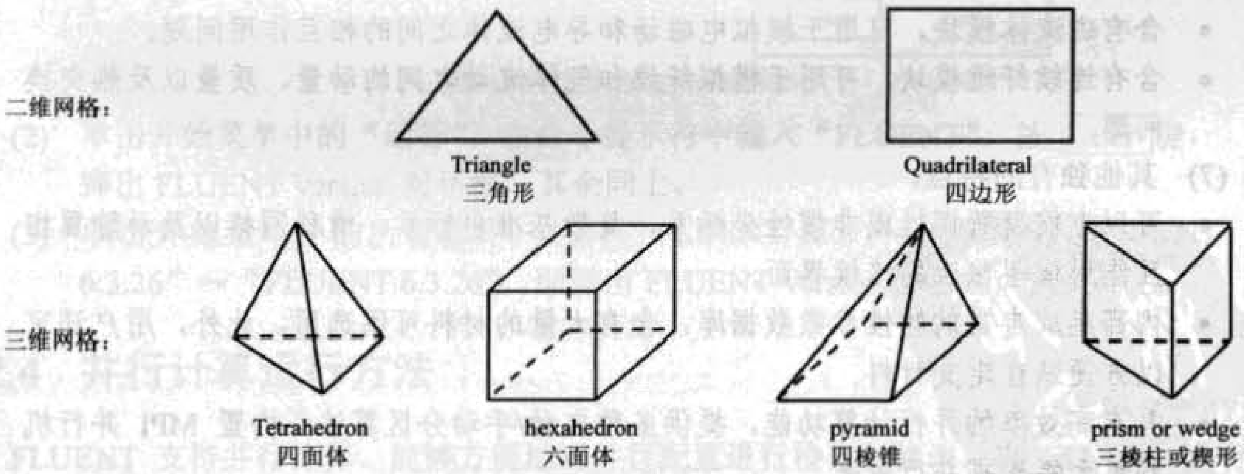


图2-2 FLUENT 的网格形状

(2) 定常/非定常流动模拟。可以模拟定常与非定常流动，且新增快速非定常模拟功能。

(3) 先进的动/变形网格技术。主要解决边界运动问题，用户只需指定初始网格和

运动壁面的边界条件，余下的网格变化完全由解算器自动生成。网格变形方式有 3 种：弹簧压缩式、动态铺层式及局部网格重划式，其局部网格重划式是 FLUENT 所独有的，且用途广泛，可用于非结构网格、变形较大问题以及物体运动规律事先不知道而完全由流动所产生的力所决定的问题。FLUENT 解算器包括 NEKTON、FIDAP、POLYFLOW、ICEPAK 及 MIXSIM。

(4) 多网格支持功能。FLUENT 具有强大的网格支持功能，支持界面不连续的网格、混合网格、动/变形网格以及滑移网格等。需要强调的是，FLUENT 还拥有多种基于解的网格自适应、动态自适应技术以及动网格与网格动态自适应相结合的技术。

(5) 多种数值算法。FLUENT 采用有限体积法，提供了非耦合隐式算法、耦合显示算法、耦合隐式算法 3 种数值算法，是目前商用软件中最多的。

(6) 丰富先进的物理模型。

- 用户利用 FLUENT 可以精确地模拟无粘流、层流、湍流。湍流模型包括 Spalart-Allmaras 模型、$k-\varpi$ 模型组、$k-\varepsilon$ 模型组、雷诺应力模型、大涡模拟模型以及最新的分离涡模拟模型及 V2F 模型等。另外，用户还可以根据需要自己定制或添加湍流模型。有关湍流模型的详细介绍见第 4 章。
- FLUENT 提供了牛顿流体、非牛顿流体的数值计算模型。
- 含有强制/自然/混合对流的热传导，固体/流体的热传导、辐射等模型。
- 包含了多种化学反应及燃烧模型，可以完成化学组分的混合/反应计算。
- 包含自由表面流模型、欧拉多相流模型、混合多相流模型、颗粒相模型，空穴两相流模型及湿蒸汽模型等。
- 可以模拟熔化/凝固，蒸发/冷凝相变模型。
- 提供了非均质渗透性、惯性阻抗、固体热传导，多孔介质模型。
- 含有风扇、散热器、以热交换器为对象的集中参数模型。
- 基于精细流场解算的预测流体噪声的声学模型。
- 含有磁流体模块，可用于模拟电磁场和导电流体之间的相互作用问题。
- 含有连续纤维模块，可用于模拟纤维和气体流动之间的动量、质量以及热交换问题。

(7) 其他独有的特点。

- 可以方便设置惯性或非惯性坐标系、复数基准坐标系、滑移网格以及动静翼相互作用模型化后的接续界面。
- 内部集成丰富的物性参数数据库，含有大量的材料可供选用，此外，用户还可以方便地自定义材料。
- 具有高效率的并行计算功能，提供多种自动/手动分区算法；内置 MPI 并行机制可大幅提高并行效率。
- 拥有友好的用户界面，并提供了二次开发接口（UDF）。
- 含有后处理和数据输出功能，可对计算结果进行处理，生成可视化的图形及相应的曲线、报表等。

2.2.2 UNIX 版本运行方法

在 UNIX 系统下，可在命令行启动 FLUENT 的适当版本，如 FLUENT 2d 为二维单精度版本，FLUENT 2dd 为二维双精度版本，其余的 3d、3dd 对应了三维单精度和三维双精度版本。

也可以在 FLUENT 控制台窗口的“Version>”提示符后输入 2d、2dd、3d 或 3dd 启动相应的版本。还可以在图形用户界面中执行“File”→“Run”命令，从而选择合适的版本。

2.2.3 Windows 版本运行方法

FLUENT 最初只支持 UNIX 操作系统，面向高端用户。随着 Windows 系统的普及，FLUENT 也开始支持 Windows 系统，但是其前处理软件 GAMBIT 仍然需要在 UNIX 类型的操作系统下才能正常运行，所以要在 Windows 系统下运行 FLUENT 必须安装一个模拟 UNIX 环境的软件——Exceed。

按照 Exceed→GAMBIT→FLUENT 的安装顺序安装完之后，就可以在 Windows 窗口中运行 FLUENT 了，其运行方法有 3 种。

(1) 直接利用桌面快捷方式，双击 FLUENT 6.3.26 快捷图标，在弹出的 FLUENT Version 对话框中选择需要用到的二维/三维单精度/双精度解算体，单击 Run 按钮，即启动了 FLUENT，如图 2-3 所示。

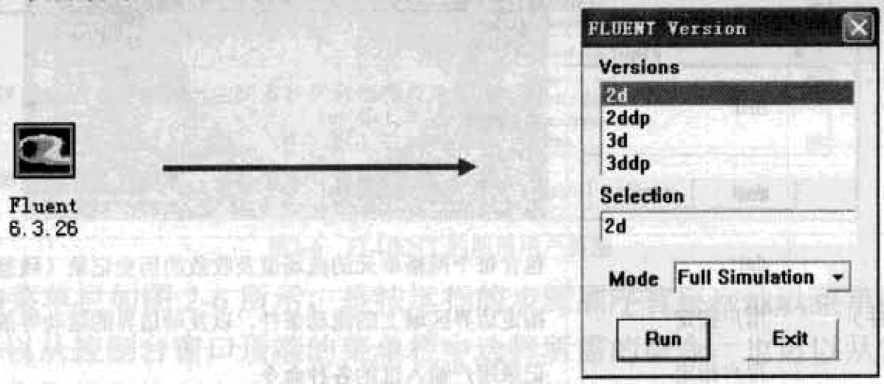


图2-3　FLUENT 的直接启动图示

(2) 单击开始菜单中的“运行”，在命令提示符中输入“FLUENT”，按 Enter 键，弹出 FLUENT Version 对话框，其余同上。

(3) 单击开始菜单中的所有程序，选择“FLUENT Inc Products”→“FLUENT 6.3.26”→“FLUENT 6.3.26”，即弹出 FLUENT Version 对话框，其余同上。

2.2.4 并行计算运行方法

FLUENT 支持并行计算，能够方便地对并行配置进行检查和修改。在 FLUENT 并行计算中，需要将网格和数据分割成多个更小的子部分，然后将每个子网格分配给对应的一个计算进程，每个计算进程分别称为一个计算节点。每个计算进程求解一个特定的子部分，并在相互之间的接口处进行信息交换。子网格个数可以是计算节点的整数倍，比如将 1 个网格分割成 8 个子网格，可运行在 1、2、4、8 个计算节点上进行计算。

并行计算运行前需要进行网络通信配置，然后才能启动并行计算环境。在 Windows 系统中，单击“开始”按钮，在“运行”对话框中输入“FLUENT 2d–r6.3.26–t2”，启动 FLUENT 并行计算，如图 2-4 所示。

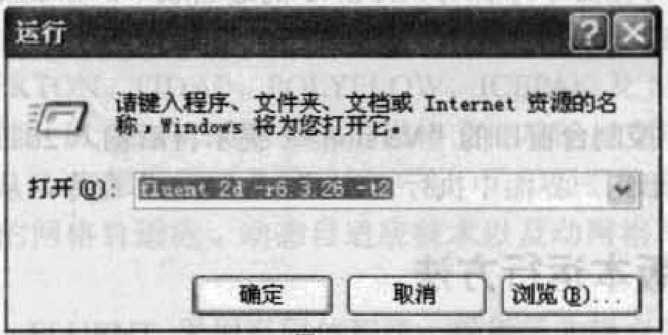


图2-4

图2-5 启动 FLUENT 并行计算

2.2.5 FLUENT 的文件类型

FLUENT 的输入、输出文件类型较多，其中输入文件包括 Grid、Case、Data、Profile、Scheme 及 Journal，输出的文件有 Case、Data、Profile、Journal 及 Transcript。FLUENT 还可以保存对话框的布局及图形窗口的硬拷贝，使用各种可视化及后处理工具可以输出数据。FLUENT 中的主要文件类型如表 2-1 所示。

表2-1 FLUENT 中的主要文件类型

文件名称	后缀名	文件内容
Grid（网格文件）	msh	包含所有节点的坐标及节点间的连接信息，不含边界条件、流动参数及求解参数
Case（案例文件）	cas	包括网格、边界条件、求解参数、流动参数、物性参数、用户界面和图形环境的信息
Data（数据文件）	dat	包含每个网格单元的流场值及收敛的历史记录（残差值）
Profile（边界信息文件）	用户指定	指定边界区域上的流动条件，以及动边界的运动等条件
Journal（日志文件）	用户指定	记录用户输入过的各种命令
Transcript（副本文件）	用户指定	记录全部输入及输出信息
Hardcopy（硬拷贝文件）	取决于输出格式	将图形窗口中的内容硬拷贝输出为 TIFF、PICT 和 BMP 等格式的图形文件
Export（输出文件）	取决于输出格式	将数据输出到 AVS、DataExplorer、Ensight、FAST、FIELDVIEW、I-DEAS、NASTRAN、PATRAN 及 Tecplot 等第三方 CAD/CAE 软件
Scheme（源文件）	scm	定制 FLUENT 的界面，控制 FLUENT 的运行
Interpolation（转接文件）	用户指定	不同网格求解时的转接文件，FLUENT 允许用户用两种网格方案求解同一问题，中间通过 Interpolation 文件交换数据
Fluent（配置文件）	fluent	包含 Scheme 语言写成的语句，用于 FLUENT 进行定制和控制。FLUENT 启动时，要寻找该文件，若找到它，就加载它
Cxlayout（界面布局文件）	cxlayout	保存当前对话框及图形窗口的布局

2.3 FLUENT 的操作界面

FLUENT 的操作界面有两种：图形界面（GUI）和文本界面（TUI），控制包括菜单、按钮的图形界面和终端仿真程序。

2.3.1 图形用户界面

FLUENT 的图形用户界面由菜单、对话框及图形窗口组成，如图 2-5 所示。刚启动 FLUENT 时只显示控制台窗口，即图 2-5 所示最底层的窗口。当用户从此窗口发出某些与网格或图像有关的命令时，FLUENT 就会打开新的窗口，如图 2-5 左下角所示的图形窗口。此外，许多命令在执行过程中都会弹出面板或对话框，如图 2-5 右下角所示的对话框。

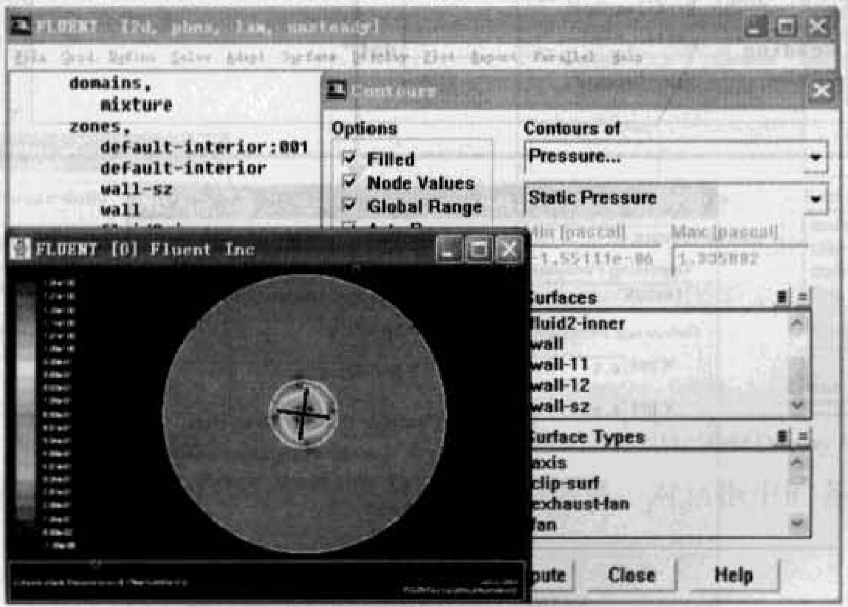


图2-6 FLUENT 的图形用户界面

FLUENT 的菜单栏如图 2-6 所示，是按运行的步骤顺序有层次地以菜单的方式组织在一起的。用户既可以从控制台窗口顶端的菜单栏中选择所需的命令，也可以从窗口中的命令行输入信息。菜单中提供了控制台中的大部分命令，菜单的使用方法很简单，执行（鼠标左键单击）菜单中的某个命令即可弹出相应的对话框。如图 2-7 所示，执行 Define 菜单中的 Operating Conditions...命令，将弹出 Operating Conditions（操作环境）对话框。

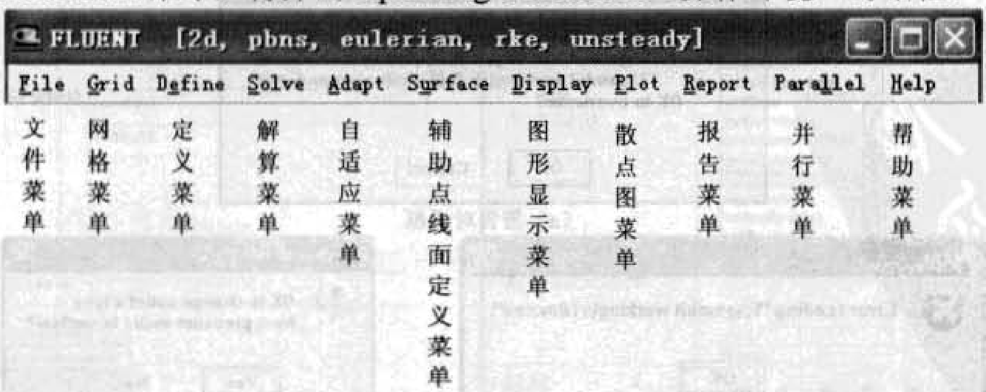


图2-7 菜单栏

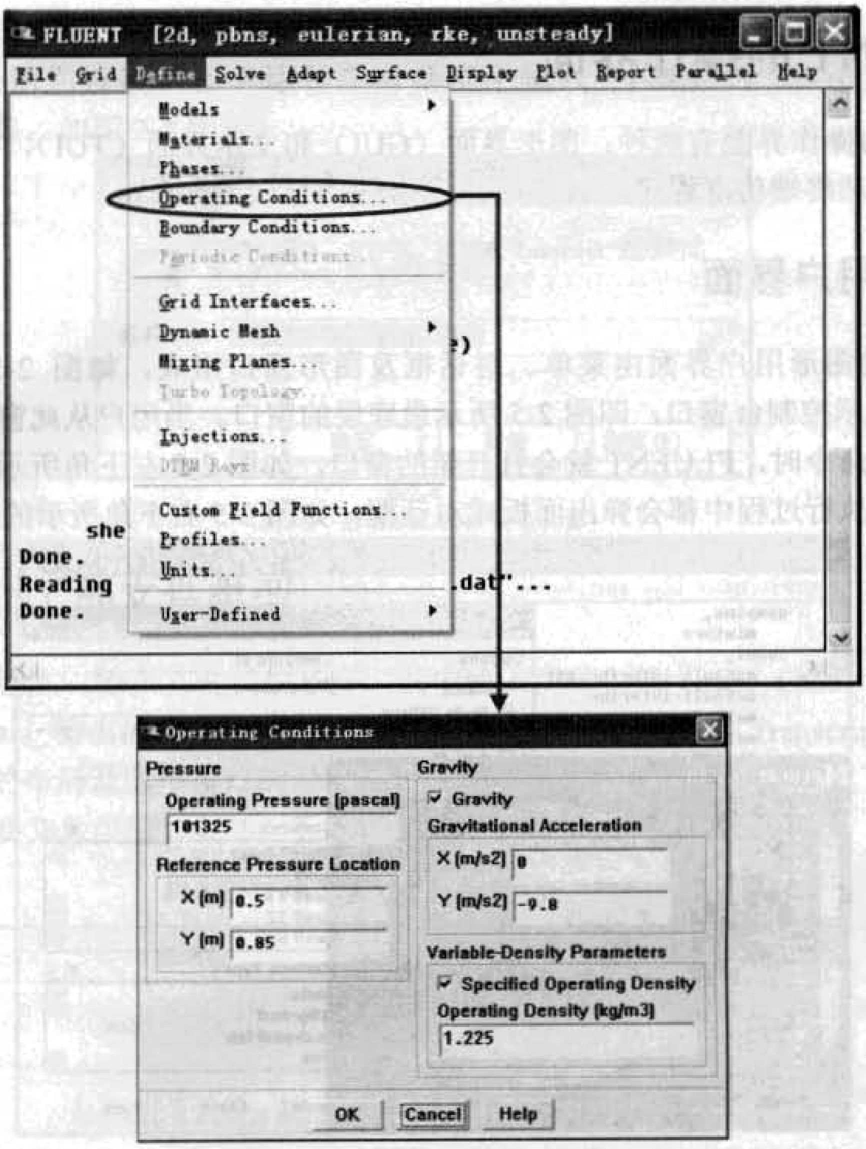
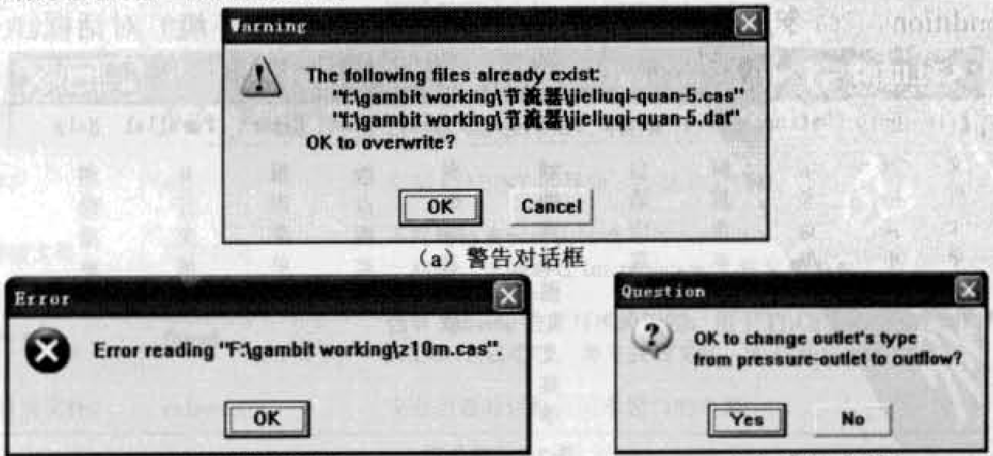


图2-8 Define 菜单及 Operating Conditions 对话框

FLUENT 的对话框可以简单地分为两种，一种用于完成简单的输入/输出任务，如警告、错误和询问，如图 2-8 所示。这种对话框是临时窗口，出现时要对其进行响应。如信息提示框告诉我们需要知道的信息，单击 OK 按钮关闭；又如警告对话框用于警告某些潜在问题，并询问是否继续当前的操作。



（a）警告对话框

（b）错误对话框

（c）询问对话框

图2-9 FLUENT 常见对话框

FLUENT 的另一种对话框用于处理复杂的输入任务，使用这种对话框更像是填充一个表格。这种对话框都是独一无二的，而且使用各种类型的输入控制组成表格。在对话框的控制下输入数据后，需要应用所改变的设置，或者取消所改变的设置。

应用所改变的设置之后立刻关闭对话框，这种对话框有两个按钮：单击 OK 按钮应用设置并关闭对话框；单击 Cancel 按钮关闭对话框而且不做任何改变，如图 2-9 所示。

应用所改变的设置之后仍然不关闭对话框，这时可以做更多的设置。后处理和自适应网格中经常会出现这样的对话框，如图 2-10 所示。Apply 按钮表示应用设置不关闭对话框，这一按钮经常也有其他的名称，比如后处理过程中该按钮的名字是 Display，自适应网格中这个按钮名字是 Adapt，Close 按钮表示关闭对话框。

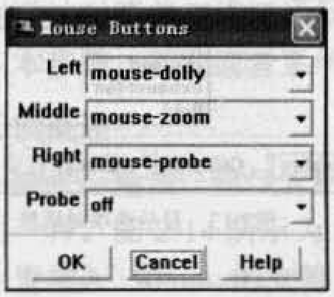


图2-10　Mouse Buttons 对话框

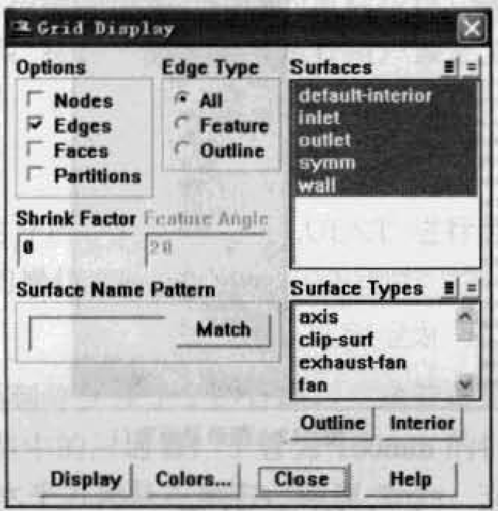


图2-11　Grid Display 对话框

对话框中的 Help 按钮用于显示如何使用对话框的信息。对话框中的各种类型输入控制如表 2-2 所示。

表2-2　对话框中的各种类型的输入控制

输入控制	视图显示	输入控制	视图显示
单击按钮	Display	单选项	All Feature Outline
复选项	Nodes Edges Faces Partitions	下拉列表	Contours of Pressure... Static Pressure
数据输入栏	Cp (j/kg-k) constant Edit... 1006.43	单选列表	Type inlet-vent intake-fan interface mass-flow-inlet outflow outlet-vent pressure-far-field pressure-inlet pressure-outlet symmetry velocity-inlet wall
文本框	New Surface Name line-5	数目箭头选择	Number of Iterations 20
多选列表	Boundaries default-interior inlet outlet symm wall	标尺	1 Frame Slow　Replay Speed　Fast

图形显示窗口如图 2-11 所示，可以通过显示选项对话框（见图 2-12）来控制图形显示的属性，也可以打开另一个显示窗口。鼠标按键对话框可以用于设定鼠标在图形显示窗口单击时所执行的操作。当为图形显示处理数据时要取消显示操作可以按 Ctrl+C 键，已经开始画图的话就无法取消操作了。

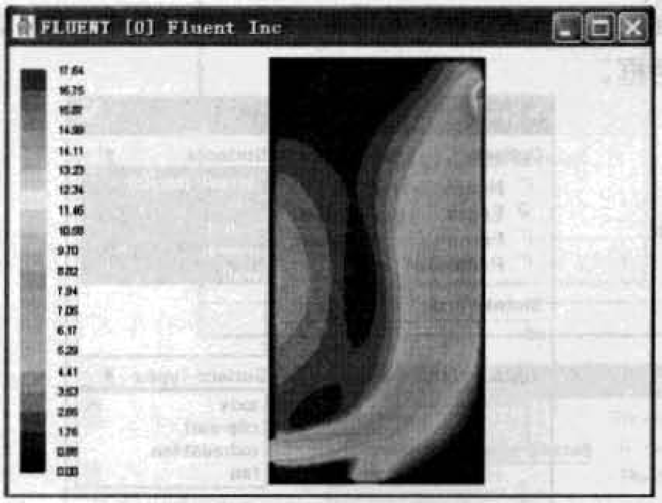


图2-12　图形显示窗口

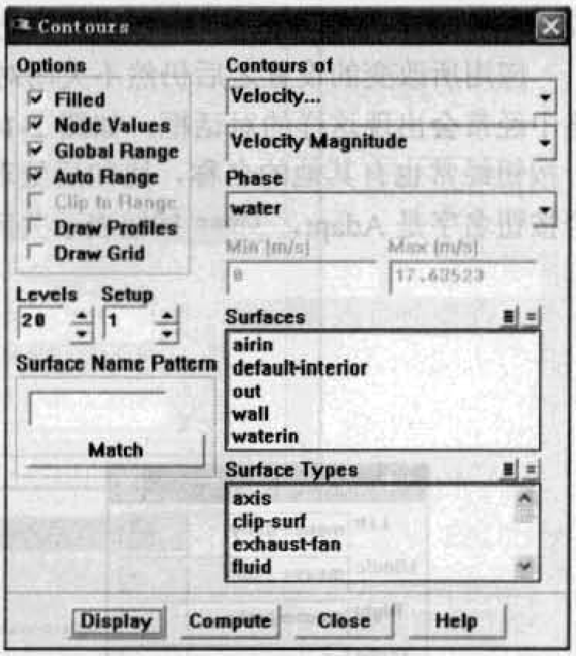


图2-13　显示选项对话框

2.3.2 文本用户界面

FLUENT 控制台窗口是一文本界面，用户可借助此界面输入各种命令、数据和表达式，FLUENT 也利用这个窗口显示信息，从而达到用户与 FLUENT 交互的目的。需要说明的是，文本界面使用了一种叫做 Scheme 的编程语言对用户输入的命令和表达式进行管理。Scheme 是 LISP 语言的一种，简单易学，尤其是其宏功能非常有用。

文本界面中的命令行提示符位于最下面一行，刚一启动 FLUENT 时，显示为“>”。用户可在此提示符下输入各种命令或 Scheme 表达式，直接按 Enter 键可显示当前菜单层次下的所有命令。如在根目录下直接按 Enter 键，则显示菜单栏相对应的同名命令，如图 2-13 所示。

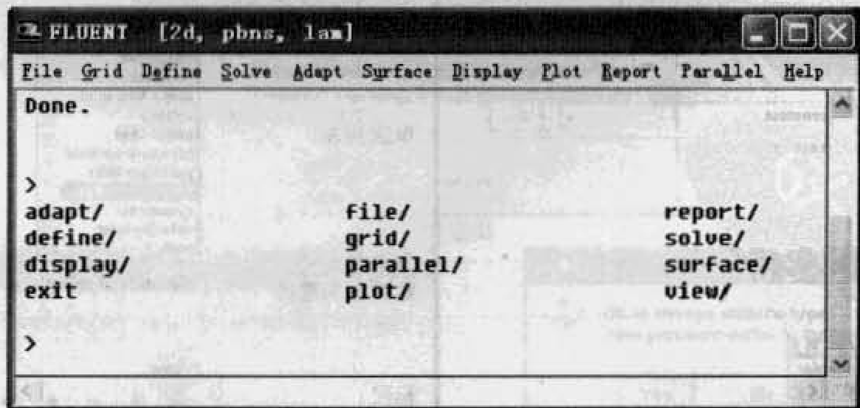


图2-14　文本界面中菜单栏相对应同名命令的显示

在命令行提示符下，用户除了可以输入 FLUENT 命令外，还可以输入由 Scheme 函数组

成的具有复杂功能的 Scheme 表达式。详细信息请参阅 FLUENT 用户手册。

2.3.3 图形控制及鼠标使用

执行 Display 和 Plot 菜单中的相关命令可进行图形显示内容的选择和属性的设置。执行 Display→Contours 命令可显示压力、速度等物理量的云图（或等值线图）；执行 Display→Options 命令可进行图形窗口的显示属性的修改。右键单击图形窗口左上角，弹出一个对话框，让用户复制或打印图形。要改变图形窗口的背景色或网格颜色，可直接在命令行输入 display/set/color，然后输入要改变颜色的对象名称以实现颜色的改变。

执行 display→mouse bottons 命令，可调整鼠标按键的定义。默认的鼠标按键功能是：按住左键拖动为移动图形；按住中键拖动为缩放图形；按住右键拖动为执行用户预定义的操作。

【实例 2-1】：二维三通管内流体的流动分析

本实例通过对简单二维三通管内流体流动问题的分析，介绍运用 FLUENT 进行数值仿真计算的基本步骤，帮助读者系统地认知 FLUENT 的操作流程。

一、实例概述

在实际输水、输油、输气管路工程中，经常会遇到分支或交叉的管路，三通管就是其中最为常见的一种。图 2-14 所示为水平放置的输水管路中的三通管，干管为 100mm 的钢管，管段中间位置接入 50mm 的支管，干管水流方向为水平方向从左至右，流速 2m/s。支管的水流速度为 1m/s。那么，支管水流汇入后对干管水流产生多大的影响，交汇后在下游的流动情况如何，这些是我们需要解决的实际问题。下面我们就用 FLUENT 来进行管内流场的模拟。

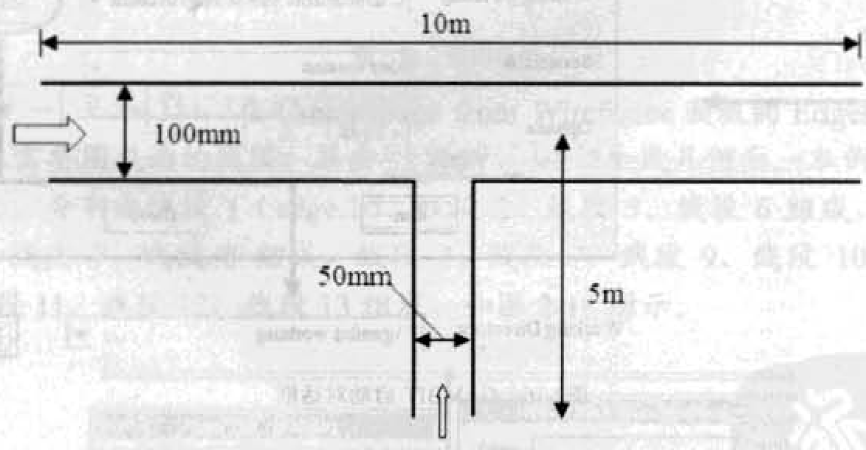


图2-15 三通管几何模型简图

思路分析

由于管路水平放置，所以可暂不考虑重力方向的影响，于是可以把问题简化为二维问题，即研究水平截面上三通管内水流的流动现象。

通过本实例的演示过程，读者将学习到：

- 前处理软件 GAMBIT；
- 点、线、面的绘制；

- 网格的划分；
- 边界类型的定义；
- 网格的输出；
- 二维单精度解算器的选择；
- 材料的定义；
- 边界数据的定义；
- 控制参数的设置；
- 迭代步数的设置；
- 收敛的判断；
- 图形的后处理。

结果文件——参见附带光盘“Ch2\rmsl.msh”、“Ch2\rmsl.dbs”、“Ch2\rmsl.jou”、“Ch2\rmsl.trn”、“Ch2\rmsl.cas”、“Ch2\rmsl.dat”。

动画演示——参见附带光盘“Ch2\AVI\rmsl.avi”。

二、模型建立

1. 双击 GAMBIT 的桌面快捷方式，弹出 GAMBIT 启动对话框，如图 2-15 所示。默认的工作目录是 C:\Documents and Settings\Administrator，用户可以通过 Browse 按钮选择合适的工作目录，如 F:\gambit working，以方便计算结果的存放与查看。单击 Run 按钮，即启动了 GAMBIT。

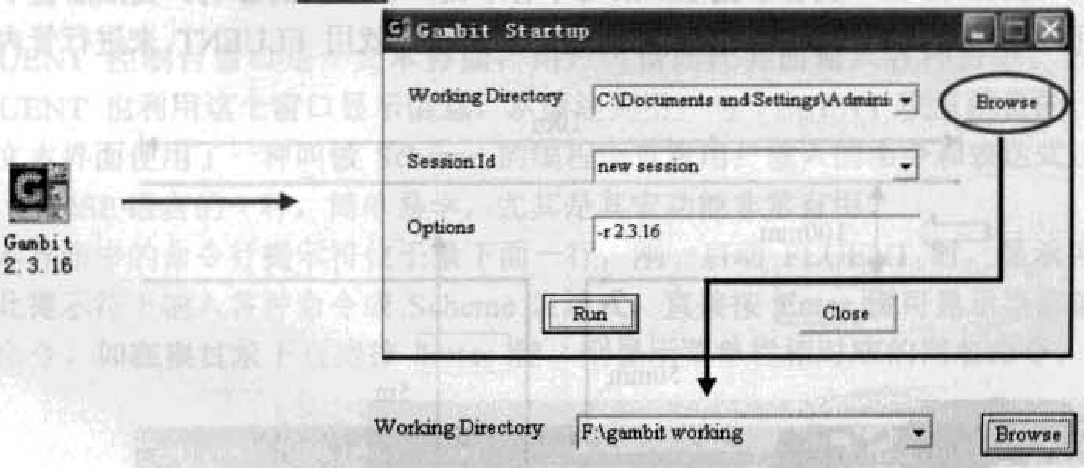


图2-16 GAMBIT 启动对话框

注意： GAMBIT 的工作目录最好全为英语或拼音，即工作文件夹要用英语或拼音命名，否则将出现乱码，不便下次调用。

2. 单击 → → ，在 Create Real Vertex 面板的 x、y、z 坐标输入栏中输入（0，0.05，0），单击 Apply 按钮生成第一个点，随后按同样方法依次建立点（0，-0.05，0）、点（10，-0.05，0）、点（10，0.05，0）、点（4.975，-0.05，0）、点（4.975，-5，0）、点（5.025，-5，0）、点（5.025，-0.05，0）、点（5.025，0.05，0）和点（4.975，0.05，0）等 9 个点，如图 2-16 所示，这样就完

成了本例几何模型的基础点绘制。

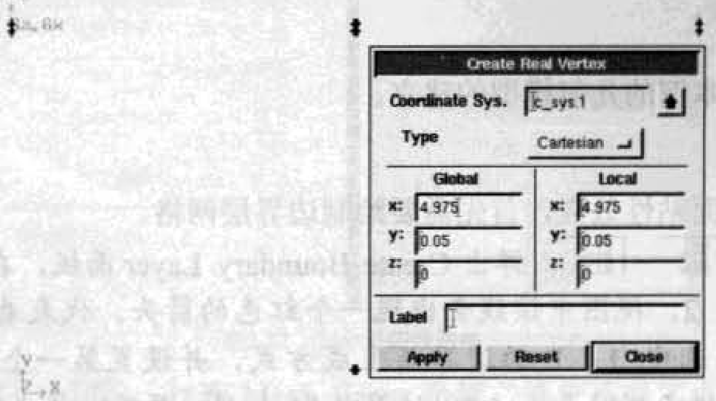


图2-17　基础点的绘制

3. 单击[图标]→[图标]→[图标]，在 Create Straight Edge 面板中选择点 1（Vertix.1）与点 2（Vertix.2），建立这两点间的线段，然后依次建立点 1 与点 10、点 9 与点 10、点 4 与点 9、点 2 与点 5、点 5 与点 10、点 8 与点 9、点 5 与点 8、点 3 与点 8、点 3 与点 4、点 5 与点 6、点 6 与点 7 及点 7 与点 8 之间的线段，共 13 条线段，如图 2-17 所示。

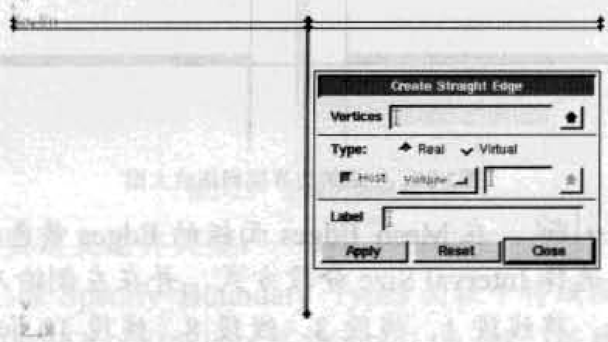


图2-18　线的绘制

4. 单击[图标]→[图标]→[图标]，在 Create Face from Wireframe 面板的 Edges 黄色输入栏中选取需要围成面的线段，单击 Apply 按钮生成几何面。本例共生成 4 个几何面，分别由线段 1（edge.1）、线段 2、线段 5、线段 6 组成，线段 3、线段 6、线段 7、线段 8 组成，线段 4、线段 7、线段 9、线段 10 组成和线段 8、线段 11、线段 12、线段 13 组成，如图 2-18 所示。

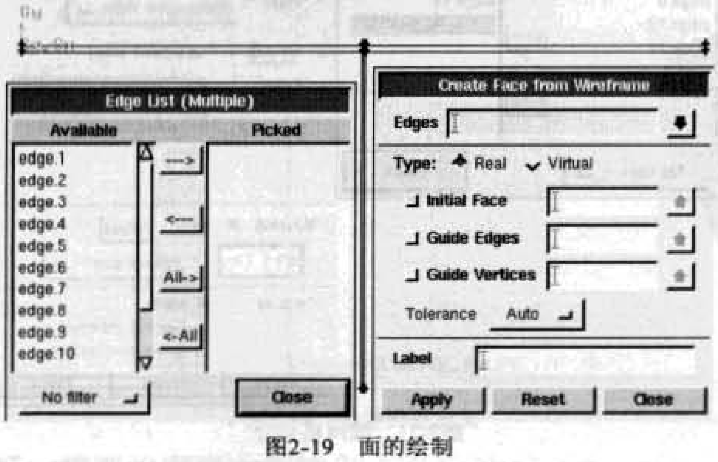


图2-19　面的绘制

注意：此处原本可以生成 1 个面，这里生成 4 个面是为了下步网格划分时提供方便（划分时不同面需要采用不同的划分尺寸）。

至此，已完成了本例的几何模型的建立。

三、网格划分

考虑到水流近壁面粘性效应，首先需要绘制边界层网格。

1. 单击 → → ，弹出 Create Boundary Layer 面板，在 Edges 黄色输入栏中选取线 2，视图中该线会出现一个红色的箭头，代表着边界层生成的方向。然后，选中 1 : 1 的边界层生成方式，并设置第一个点距壁面距离为 0.001m，递增比例因子为 1.2，边界层为 4 层。最后，单击 Apply 按钮即绘制完边界层网格。
2. 按照同样的方法生成线段 3、线段 4、线段 5、线段 8、线段 9 的边界层网格，如图 2-19 所示。

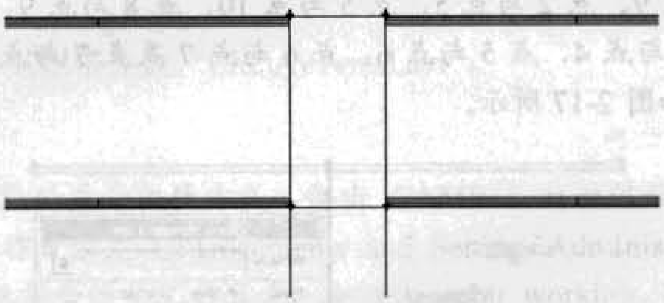


图2-20　生成的边界层网格放大图

3. 单击 → → ，在 Mesh Edges 面板的 Edges 黄色输入栏中选中图 2-20 所示的 6 根线，选择 Interval Size 分段方式，并在左侧输入栏中输入 0.1。
4. 按照同样的方法，将线段 1、线段 3、线段 8、线段 10 和线段 12 等 5 条线段以 Interval Size 为 0.01 划分，划分出来的线网格如图 2-21 所示。

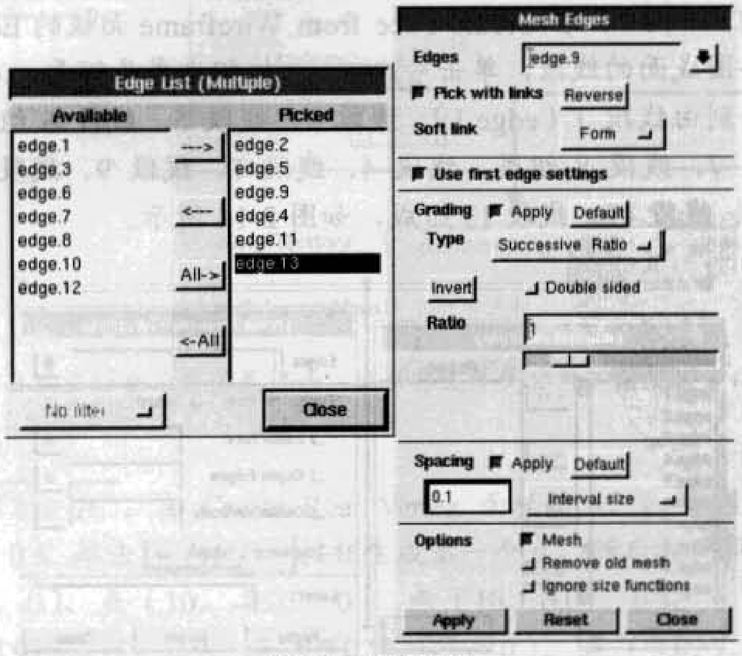


图2-21　线网格划分

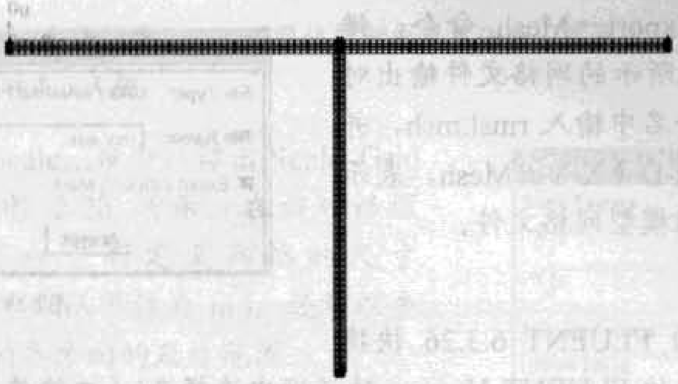


图2-22　划分好的线网格

5. 单击 → → ，打开 Mesh Faces 面板，选中已经完成线网格划分的面1、面 2、面 3 和面 4，运用 Quad 单元与 Map 方法对这 4 个面进行划分，其网格生成情况如图 2-22 所示。由于遵循的是由线到面的网格生成顺序，所以 Mesh Faces 对话框中 Interval Size 左侧输入栏的默认值 1 不需更改，直接单击 Apply 按钮即可。

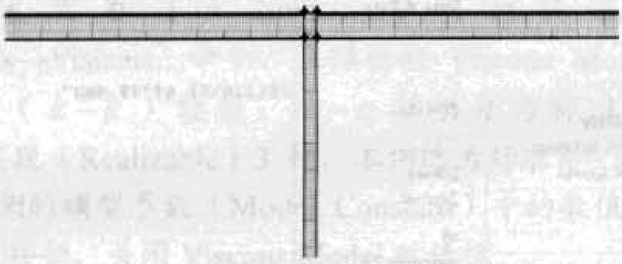


图2-23　生成的面网格

面网格划分好后，需要定义边界类型。

6. 单击 → ，在 Specify Boundary Types 面板中将线段 1 和线段 12 定义为速度入口（VELOCITY_INLET），名称为 in1 与 in2，将线段 10 定义为自由出流（OUTFLOW），名称为 out，如图 2-23 所示。

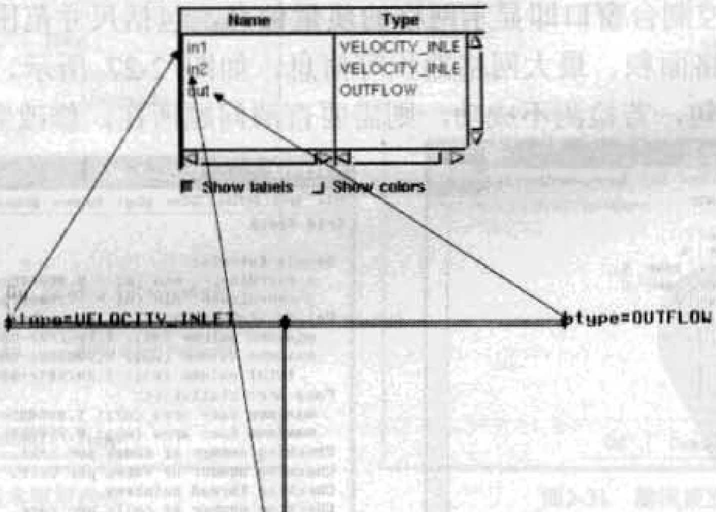


图2-24　边界类型定义

边界类型定义完后，需要将网格文件输出。

7. 执行 File→Export→Mesh 命令，弹出如图 2-24 所示的网格文件输出对话框，在文件名中输入 rmsl.msh，并选中 Export 2-D（X-Y）Mesh，表示输出的为二维模型网格文件。

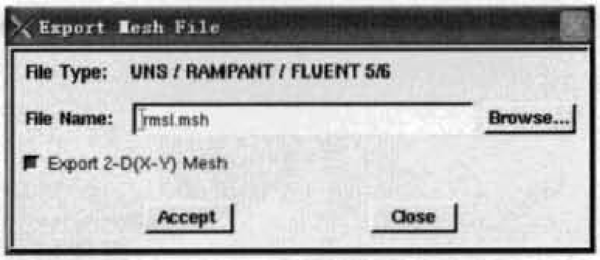


图2-25 网格输出

四、求解计算

1. 双击桌面上的 FLUENT 6.3.26 快捷图标，在弹出的 FLUENT Version 对话框中选择 2d（二维单精度）计算器，单击 Run 按钮启动 FLUENT。
2. 执行 File→Read→Case...命令，读入划分好的网格文件 "rmsl.msh"，如图 2-25 所示。

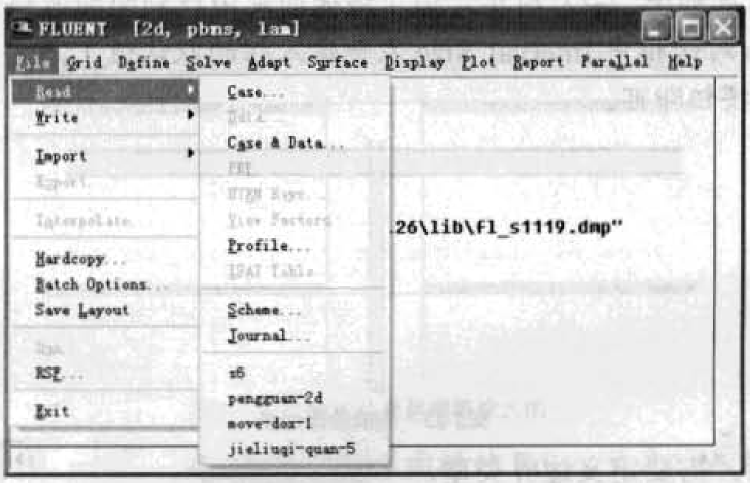


图2-26 读入划分好的网格文件

读入网格文件之后，FLUENT 控制台窗口会自动显示网格文件的基本属性，包括节点数、面数、单元数等网格信息，如图 2-26 所示。网格读入后，需要进行检查，执行 Grid→Check 命令，控制台窗口即显示网格的质量信息，包括尺寸范围、最小网格体积、最大网格体积、最小网格面积、最大网格面积等信息，如图 2-27 所示。若检测成功，最后一行会出现 "Done" 语句，若检测不成功，则需要查清问题所在，修改完善网格。

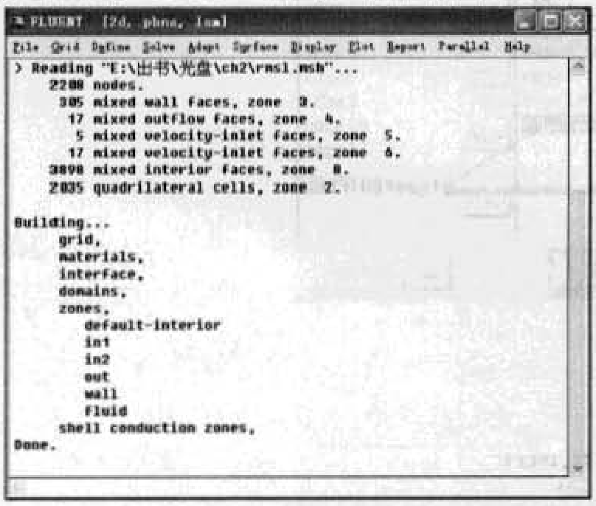


图2-27 网格读入后的窗口信息

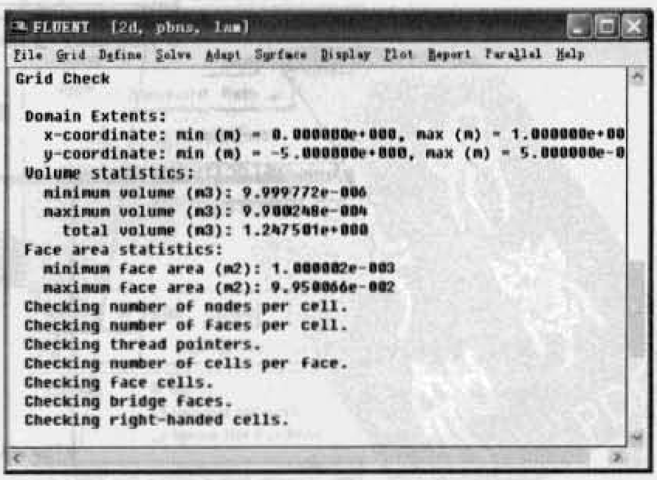


图2-28 网格检查信息

注意：若出现最小体/面积为负数的情况，证明网格划分出现负体积，需要返回到 GAMBIT 中进行修改，直到读入网格文件时显示无错。

3. 执行 Grid→Scale...命令，弹出 Scale Grid 对话框，如图 2-28 所示。在该对话框中，用户可以重新定义网格的尺寸（GAMBIT 中默认单位为 m），还可以查看网格文件的各方向的尺寸范围。

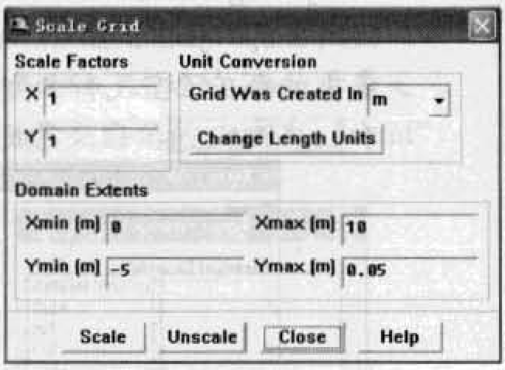


图2-29 Scale Grid 对话框

解算前最关键的一步是计算条件的定义，由 Define 菜单完成相关命令操作。

4. 执行 Define→Models→Solver...命令，弹出 Solver 对话框，如图 2-29 所示。这里用户可以选择压力基或密度基、隐式或显式、定常或非定常等基本模型，本例为默认选择，不做改动，直接单击 OK 按钮。

5. 本例水流速度为 1 ~ 2m/s，管内为湍流流动，故执行 Define→Models→Viscous...命令，在弹出的 Viscous Model 对话框中选择 k-epsilon[2 eqn]（$k-\varepsilon$）模型，$k-\varepsilon$ 模型分为标准（Standard）、重组（RNG）、可实现（Realizable）3 种，本例选为标准 $k-\varepsilon$ 模型，如图 2-30 所示。对话框右侧的模型参数（Model Constans）中的数值不做变动，取为默认值，单击 OK 按钮，关闭 Viscous Model 对话框。

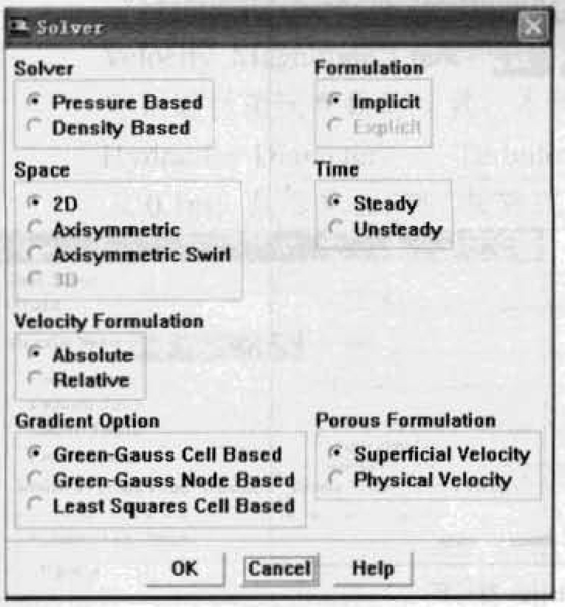


图2-30 基本模型选择

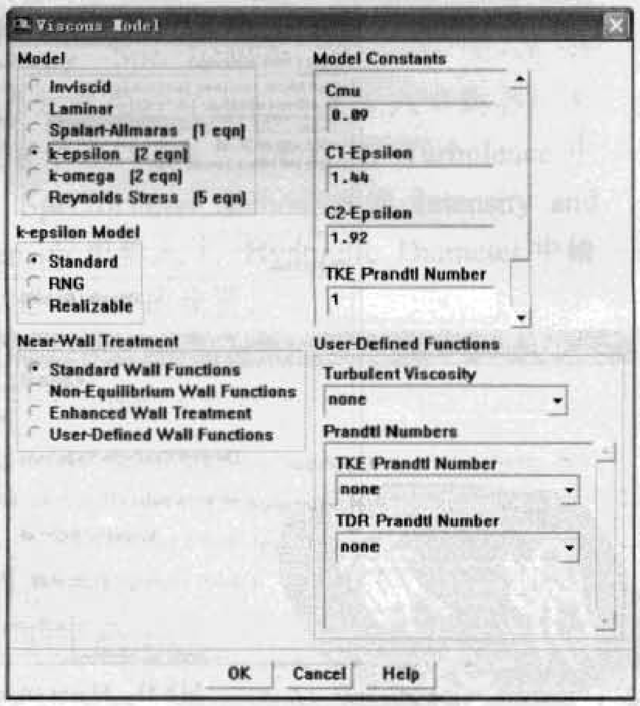


图2-31 湍流模型选择对话框

6. 执行 Define→Materials 命令，在 Materials 对话框中定义流动的材料，如图 2-31 所示。FLUENT 默认的材料为空气（air），本例要用到水，需要从 FLUENT 自带的材料数据库中调用，具体操作方法为：单击 Materials 对话框右侧的 Fluent Database... 按钮，在弹出的 Fluent Database Materials 对话框中，选择

列表中所需要的材料——水，单击 water-liquid[h2o<l>]，即会在下方的 Properties 中出现相应物理属性的数据，如密度为 998.2kg/m^3，比热容为 4182j/（kg·K）等，如图 2-32 所示。单击 Copy 按钮，即将数据库中的材料拷贝到当前工程中。然后，在 Materials 对话框中的 Fluent Fluid Materials 下拉列表中就存在了空气和水两种材料，本例选择水。最后，顺序单击 Change/Create 和 Close 按钮，完成材料的定义。

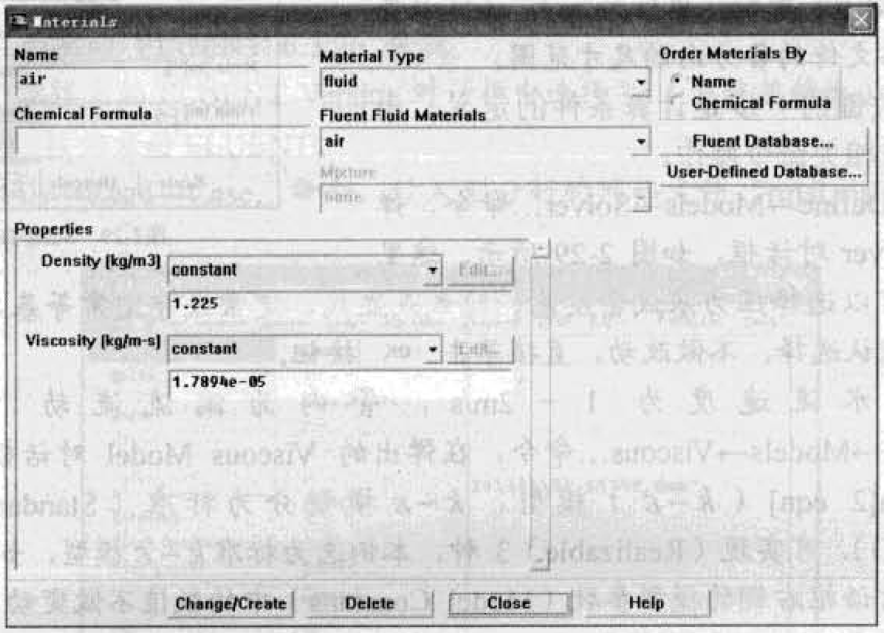


图2-32　Materials 对话框

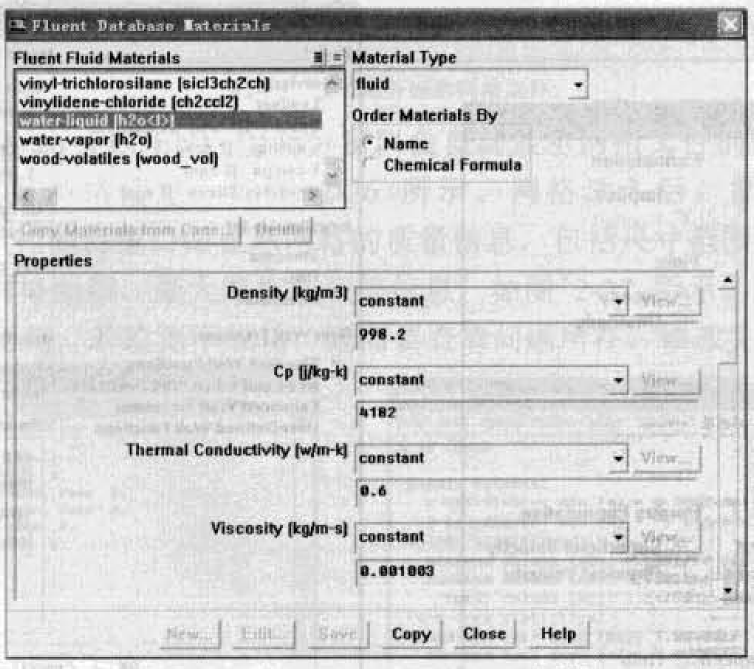


图2-33　Fluent Database Materials 对话框

注意：若 FLUENT 自带的材料数据库中找不到所需材料时，用户可以单击 User-Defined Database... 按钮进行材料的自定义。

7. 执行 Define→Operating Conditions 命令，弹出 Operating Conditions 对话框，如图 2-33 所示。其中操作压强默认为一个大气压，操作压强的参考位置默认

为原点（0，0），本实例不做改动，选为默认参数。由于本例的三通管为水平放置，不需要考虑重力的作用，故不用对 Gravity 做任何设置，单击 OK 按钮，关闭 Operating Conditions 对话框即可。

8. 接下来关键的一步是边界数据的定义，执行 Define→Boundary Conditions...命令，弹出如图 2-34 所示的 Boundary Conditions 对话框。左边的 Zone 为待定义的边界名称，右边则为对应的边界类型。本例需要定义的主要有 “fluid”、“in1”、“in2” 和 “out” 4 个边界条件。

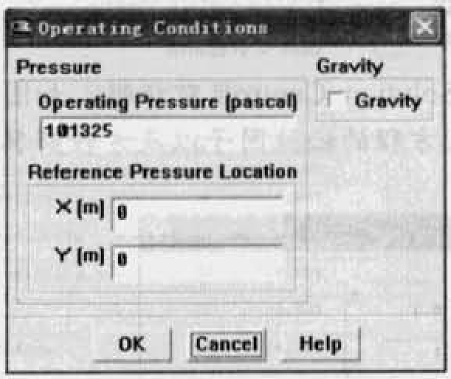


图2-34 Operating Conditions 对话框

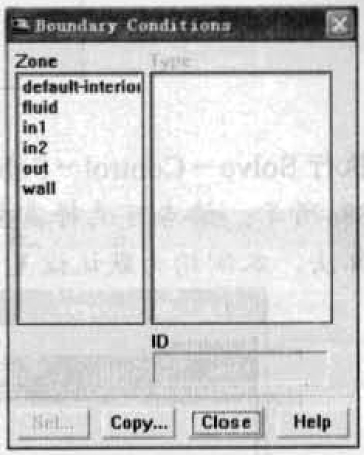


图2-35 Boundary Conditions 对话框

- 选择 fluid，其类型 Type 为 fluid，单击 Set... 按钮，在图 2-35 所示的 Fluid 对话框中的 Material Name 的下拉列表中选择 water-liquid，单击 OK 按钮。
- 选择 in1，其类型 Type 为 velocity-inlet，单击 Set... 按钮，在图 2-36 所示的 Velocity Inlet 对话框中的 Velocity Specification Method 中选择 “Magnitude,Normal to Boundary”，表示速度进口方向垂直于入口边界；在 Velocity Magnitude（m/s）中输入 2，表示进口速度为 2m/s；在 Turbulence 中可以进行湍流参数的设置，本例选择 Specification Mehod 中的 Intensity and Hydraulic Diameter，在 Turbulent Intensity 中输入 1，Hydraulic Diameter 中输入 0.1m；最后单击 OK 按钮完成速度进口 in1 的设置。

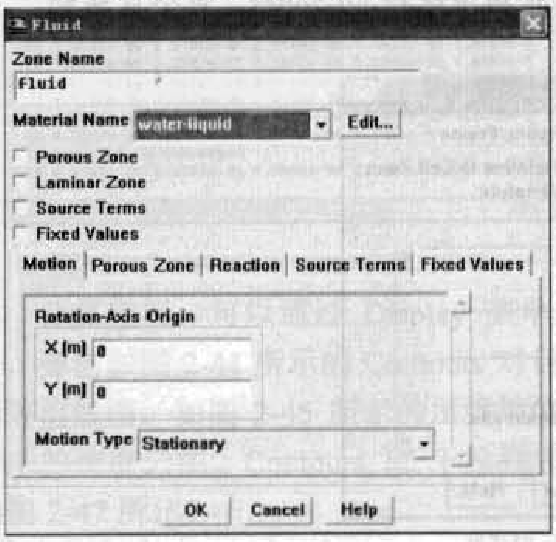


图2-36 Fluid 对话框

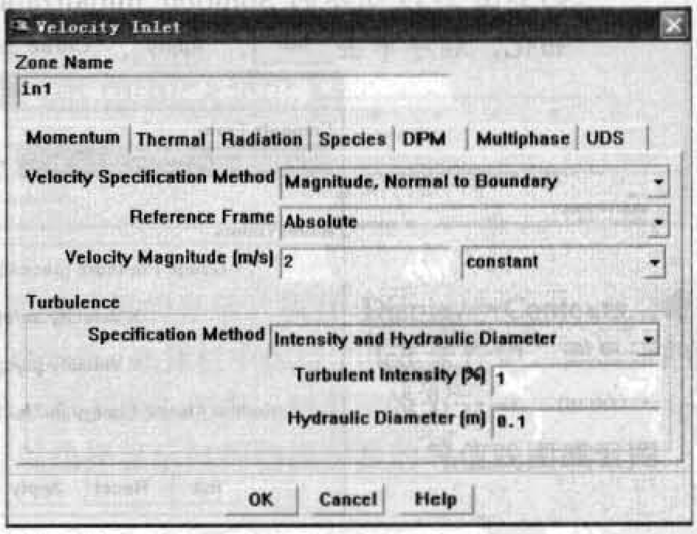


图2-37 Velocity Inlet 对话框

- in2 的设置同 in1，区别仅在于 Velocity Magnitude（m/s）中输入 2 和 Hydraulic

Diameter 中输入 0.05m。

- 选择 out，其类型 Type 为 outflow，单击 Set... 按钮，在图 2-37 所示的 Outflow 对话框的 Flow Rate Weighting 中输入 1，表示进入的水均从该出口流出。

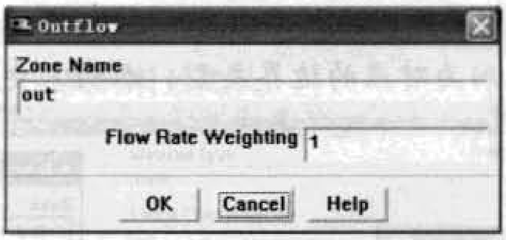


图2-38　Outflow 对话框

9. 执行 Solve→Control→Solution...命令，弹出 Solution Controls 对话框，如图 2-38 所示。读者可选择需要计算的方程、定义方程的松弛因子以及方程解算的算法，本例均为默认设置。

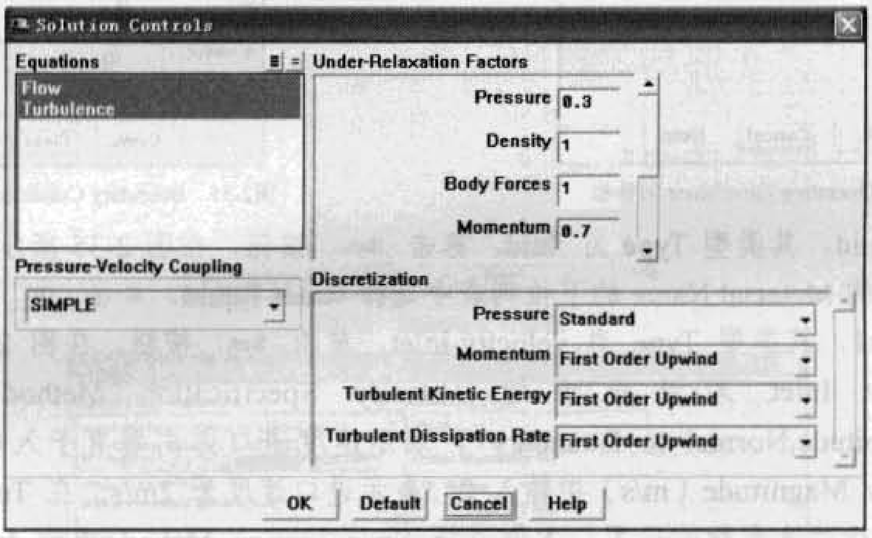


图2-39　Solution Controls 对话框

10. 接下来，对流场进行初始化。执行 Solve→Initialize→Initialize...命令，在弹出的如图 2-39 所示的 Solution Initialization 对话框中选择 all-zones，对全区域初始化，顺序单击 Init 、Apply 、Close 按钮。

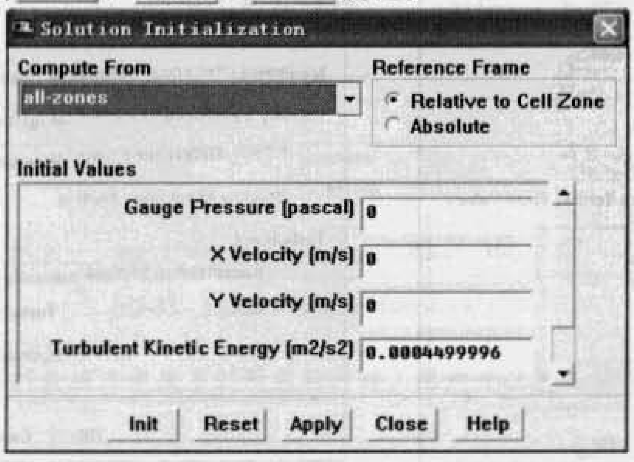


图2-40　Solution Initialization 对话框

11. 初始化后，执行 Solve→Monitors→Residual...命令，在弹出的 Residual

Monitors 对话框中选中 Plot，以打开残差曲线图，如图 2-40 所示。在对话框下方的 Criteria 中可以输入各参数的收敛精度要求，FLUENT 默认值为 0.001。

12. 完成上述步骤的设置后，还需要定义迭代参数。执行 Solve→Iterate...命令，在弹出的如图 2-41 所示的 Iterate 对话框中设置 Number of Iterations 为 1000，单击 Iterate 按钮即可开始解算。

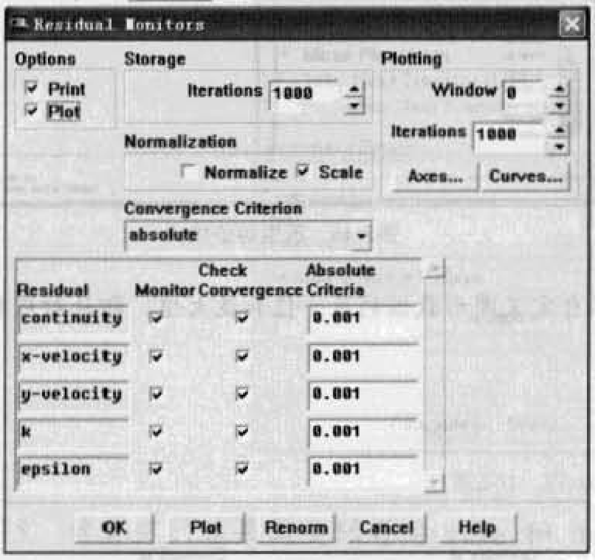


图2-41 Residual Monitors 对话框

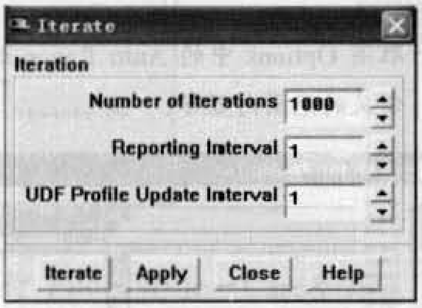


图2-42 Iterate 对话框

解算过程中，控制台窗口会实时显示计算步的基本信息，包括 x 与 y 方向的速度、k 和 ε 的收敛情况。本例在计算到 70 步后，即达到了收敛，此时窗口中会出现"solution is converged"的提示语句，如图 2-42 所示，其残差曲线如图 2-43 所示。

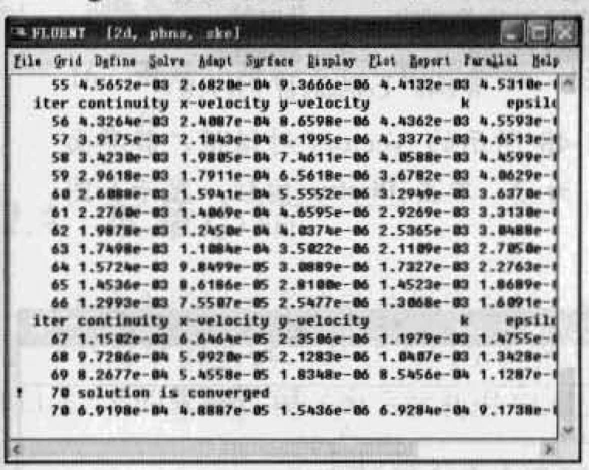


图2-43 "solution is converged"提示信息

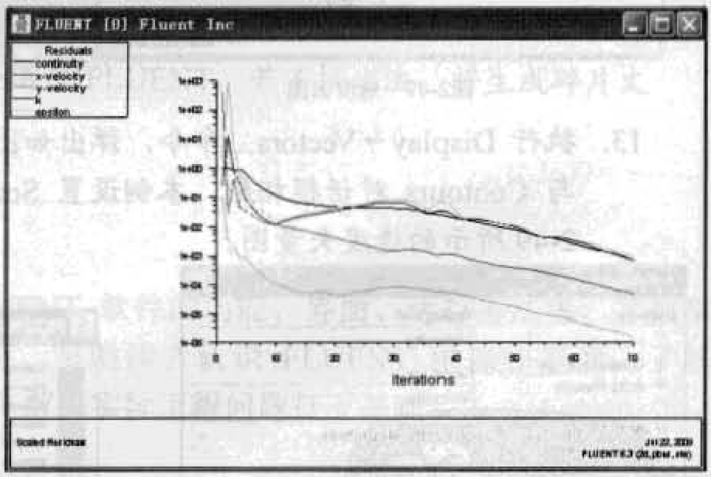


图2-44 残差曲线图

计算完后，可以通过 Display 菜单进行图形结果的显示。执行 Display→Contours...命令，弹出如图 2-44 所示的 Contours 对话框。Options 选择栏中保持 Filled 未选中，则显示的为等值线图，如图 2-45 所示的压强等值线图。若 Filled 选中，则显示的为云图，如图 2-46 所示的速度云图。Contours of 下拉列表中可以选择显示何种物理参数的等值线图或云图，如图 2-47 所示。

注意： 用户可以根据需要选择需要显示的物理参数的等值线图或云图。



图2-45　Contours 对话框

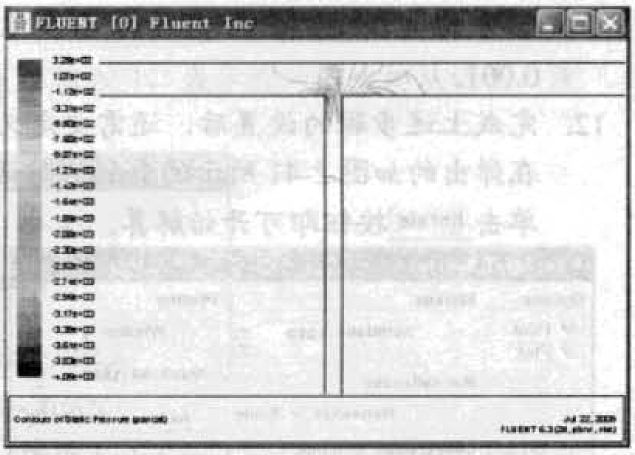


图2-46　压强等值线图

注意：取消 Options 中的 Auto Range 选项，用户可以自定义图形数据的最小值和最大值，即让对应参数在定义的范围内显示。

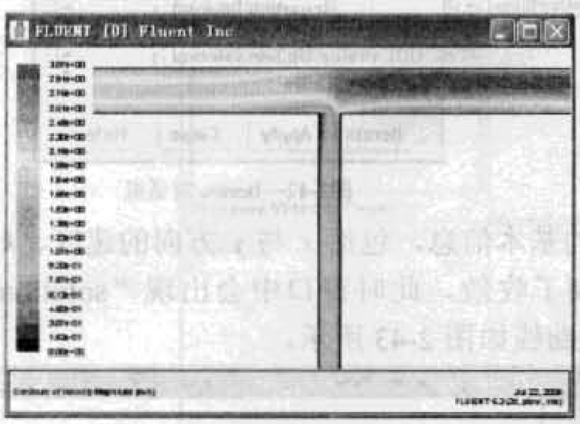


图2-47　速度云图

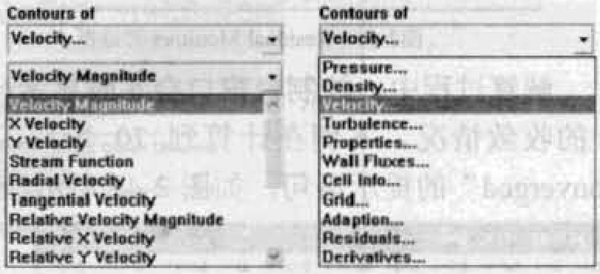


图2-48　Contours of 下拉列表栏

13. 执行 Display→Vectors...命令，弹出如图 2-48 所示的 Vectors 对话框，其界面与 Contours 对话框相似，本例设置 Scale 为 2，单击 **Display** 按钮，显示如图 2-49 所示的速度矢量图。

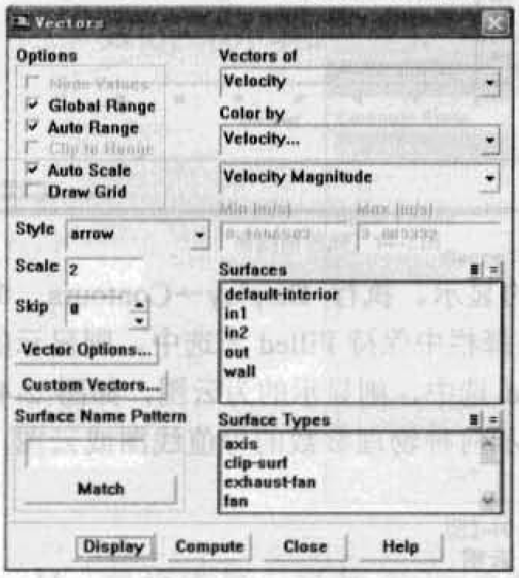


图2-49　Vectors 对话框

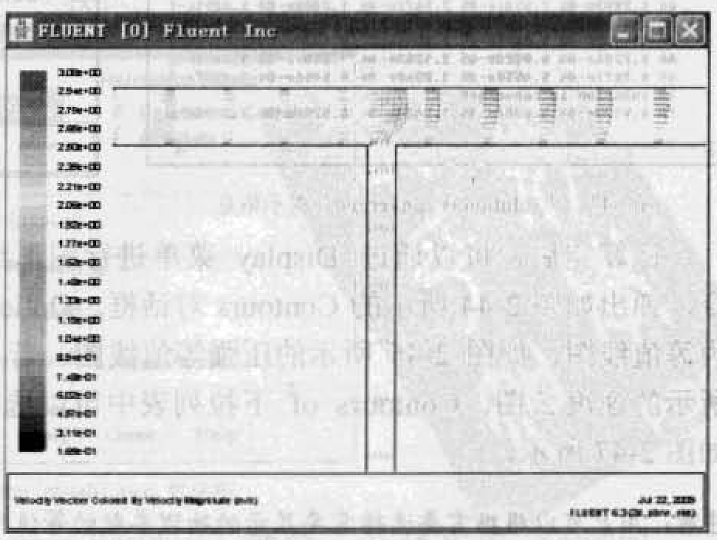


图2-50　速度矢量图

14. 除了用户可按需选择要显示的图形外，还可以进行计算报告的显示。执行 Report→Fluxes...命令，弹出如图 2-50 所示的 Fluxe Report 对话框，选中进、出口边界，单击 Compute 按钮，完成进、出口质量流量的计算，结果见 Results，可见进、出口质量流量相差 -1.144409 × 10^{-5}，满足了精度要求。

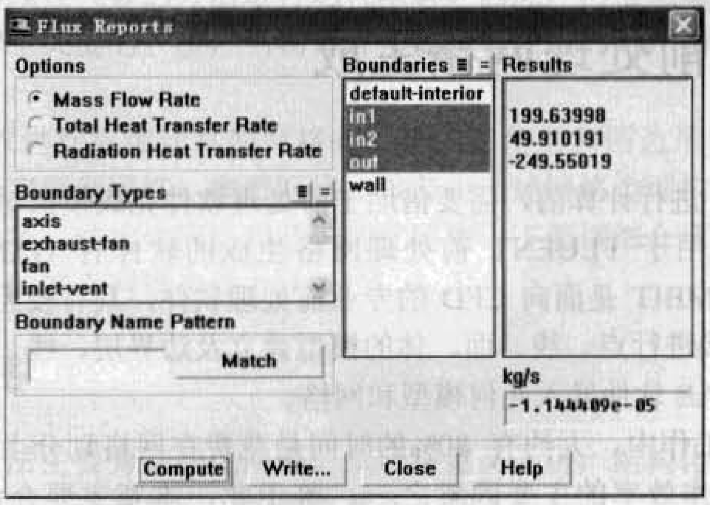


图2-51 Fluxe Report 对话框

15. 计算完的结果需要保存为 case 和 data 文件，执行 File→Write→Case&Data... 命令，在弹出的文件保存对话框中将结果文件命名为 rmsl.cas，case 文件保存的同时也保存了 data 文件 rmsl.dat。

注意：读者还可以只保存 case 或 data 文件，执行 Write→Case...或 Write→Data...命令即可，建议 case 和 data 文件同时保存。

16. 最后，执行 File→Exit 命令，安全退出 FLUENT，若不按此法，将生成碎片文件。

2.4 本章小结

本章主要讲述了流动分析的发展，FLUENT 软件的功能、界面、运行方法等，并列举了一个简单的实例。通过入门引例的介绍，帮助读者认识 FLUENT 的操作界面，了解 FLUENT 的求解过程，为后续利用 FLUENT 解决实际工程问题打下基础。

备忘录

- CFD 的概念及应用领域。
- FLUENT 软件的功能及操作界面。
- 利用 FLUENT 解决简单流动问题的操作过程。

第 3 章 前处理网格生成

在运行 FLUENT 进行计算前，需要借助于前处理软件完成模拟对象的几何模型建立与网格划分。目前，可用于 FLUENT 前处理网格生成的软件有 GAMBIT、ICEM-CFD、Gridgen 等，其中 GAMBIT 是面向 CFD 的专业前处理软件，具有较为全面的几何建模和网格划分功能，可以直接进行点、线、面、体的模型建立及边界层、线、面、体的网格划分，也可以从其他 CAD/CAE 软件导入几何模型和网格。

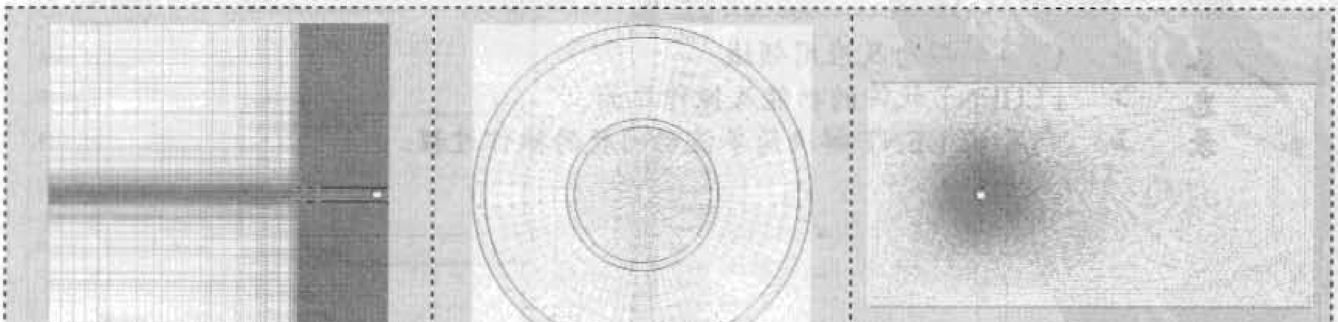
在实际仿真计算工作中，大约有 80%的时间是花费在网格划分上的，可以说网格划分能力的高低是决定工作效率的主要因素之一。鉴于此，本章主要介绍网格生成的方法及 GAMBIT 软件的使用，通过本章实例的学习，帮助读者了解 GAMBIT 的操作步骤及学会利用其对一些模拟对象进行模型的建立与网格的划分，从而在一定程度上提高网格划分效率。

本章要点

- 网格生成的基本原理及方法。
- GAMBIT 操作界面及操作方法。
- GAMBIT 几何建模。
- GAMBIT 网格划分方法。
- GAMBIT 边界定义方法。
- GAMBIT 与 CAD 软件的数据交换。

本章案例

- 二维埋地输液管与周围环境传热的模型建立与网格划分。
- 三维曲面喷管流动的模型建立与网格划分。



3.1 网格生成方法

CFD 的本质是对控制方程在计算区域上进行离散，主要为点离散（如有限差分法）或区域离散（如有限元法与有限体积法），从而使控制方程转变为在各网格点或子区域上定义的代数方程组，然后用线性代数的方法进行迭代求解。因此，网格生成是后续迭代求解的前提，也是整个计算过程中关键的一步，当物体外形复杂程度较大时，网格生成技术将起到至关重要的作用。

FLUENT 可以导入进行后续计算的网格有二维的三角形和四边形网格，三维的四面体网格、六面体网格、金字塔型网格、楔型网格，以及由上述网格类型构成的混合型网格。按其生成方法可分为两大类：结构化网格和非结构化网格。下面详细介绍结构化网格、非结构化网格及结合两者优势的混合网格生成方法。

3.1.1 结构化网格

较早的网格划分方法主要为结构化网格。从严格意义上讲，结构化网格是指网格区域内所有的内部点都具有相同的毗邻单元，即网格体系中节点排列有序、相邻点间的关系明确。结构化网格可以用直角坐标系或圆柱（球）坐标系下的坐标值表示出其网格的位置（*x*，*y*，*z*）及大小。其优点主要体现为：

- 容易实现区域的边界拟合，适于流体和表面应力集中等方面的计算；
- 网格生成的速度快；
- 网格生成的质量好；
- 数据结构简单；
- 对曲面或空间的拟合大多数采用参数化或样条插值的方法得到，区域光滑，与实际的模型更容易接近。

现有的结构化网格的生成方法基本上可分为以下 4 大类。

(1) 代数生成方法：是在得知边界上规定的网格节点位置或附加的一些参考点位置的基础上，用插值方法确定所有其他网格节点的位置。具有灵活方便、计算速度快的突出优点，但对于复杂的几何区域往往难以找到合适的插值函数进行网格生成。

(2) 保角变换方法：是指通过已知点的两条任意曲线间的夹角大小和方向不变的变换，网格生成采用保角变换方法可以生成完全正交的贴体网格，计算时间也相对较少，但仅局限于二维网格的生成，且通常对物体形状有一定的限制。

(3) 偏微分方程方法：是利用求解偏微分方程的边值问题来确定计算区域内网格点的分布情况，其适应性相对较好，且生成的网格质量较好。运用椭圆型方程生成的网格往往比较光滑，变化较为均匀，且调和函数的极值性质保证了网格生成时物理空间和计算空间之间的一一对应关系。该方法的缺点是生成较密网格时所需时间较长。

(4) 变分原理方法：是利用某个目标函数（泛函数）取极值，来达到生成网格所希望满足的要求。由于可以比较方便地将网格划分的要求用某个变分原理来表示，然后再导出和该变分原理相应的偏微分方程，即欧拉方程，该方法常用于生成自适应网格。

虽然结构化网格可以方便准确地处理边界条件，计算精度较高，并且可以采用许多高效隐式算法和多重网格法，计算效率也较高。然而，它的主要缺点是适用范围比较窄，对求解区域相对复杂的情况，网格生成较难，甚至难以实现，因此在使用上受到限制。

3.1.2 非结构化网格

为了弥补结构化网格不能够解决任意形状和任意连通区域的网格划分的缺欠，20 世纪 60 年代末人们提出了采用非结构化网格的技术手段，现已成为研究的热点之一。与结构化网格不同的是，非结构化网格是指网格区域内的内部点不具有相同的毗邻单元，即与网格划分区域内的不同内点相连的网格数目不同，网格单元和节点彼此没有固定的规律可循，其节点分布完全是任意的。从定义上可以看出，结构化网格和非结构化网格有相互重叠的部分，即非结构化网格中可能会包含有结构化网格的部分。

非结构化网格划分技术假设任何空间区域都可以被四面体（三维）或三角形（二维）单元所填满，即任何空间区域都可以被四面体或三角形为单元的网格所划分。它有两种类型：宏观非结构化网格和微观非结构化网格。宏观非结构化网格是先将空间区域划分成许多小块，每个小块用结构化网格划分，再将每个小块网格用非结构化网格连接，合并成总体的网格。它在一定程度上可以解决复杂边界问题，但块网格拓扑的形成往往需要大量的人工处理，因而不易形成工程实际所需的通用程序，且这种网格由于自适应处理常容易导致网格结构性的彻底破坏，因而也不适合于作网格自适应。微观非结构化网格是完全没有规律的、自由生成的网格，是一种任意的网格。

非结构化网格的优点为：

- 适合于复杂区域的网格划分，特别对奇性点的处理很简单；
- 其随机的数据结构更易于作网格自适应，以便更好地捕获流场的物理特性；
- 其生成过程不需求解任何方程；

非结构化网格生成的主要环节：

- 如何在计算域内合理分布网格点；
- 如何将网格点有效连接，形成三角形或四面体网格单元。

一、根据应用领域区分

根据应用的领域，非结构化网格技术可以分为应用于差分法的网格生成技术（grid generation technology）和应用于有限元方法中的网格生成技术（mesh generation technology）。应用于差分法的网格除了要满足区域的几何形状要求以外，还要满足某些特殊的性质（如垂直正交，与流线平行正交等），因而从技术实现上来说更困难一些。而应用于有限元方法的网格相对非常自由，生成的网格只需要满足一些形状上的要求就可以了。

二、根据生成网格方法区分

从生成网格的方法来区分，非结构化网格生成技术还可以分为以下 3 种。

(1) 四叉树（八叉树）方法。该方法的基本思想是先用一个较粗的矩形（立方体）网格覆盖包含物体的整个计算域，然后按照网格尺度的要求不断细分矩形（立方体），即将一个矩形分为四（八）个子矩形（立方体），最后将各矩形（立方体）划分为三角形（四面体）。例如一个没有边上中间点的矩形可以划分为两个三角形，一个没有棱上中间点的立方体可以划分为五个或六个四面体，对于流场边界附近被边界切割的矩形（立方体），则需考虑各种可能的情况，作特殊的划分。

四叉树（八叉树）方法是直接将矩形（立方体）划分为三角形（四面体），因此这种方法不涉及邻近点面的查寻，以及邻近单元间的相交性和相容性判断等问题，所以网格生成的速度很快。不足之处是网格质量较差，特别是在流场边界附近，被切割的矩形（立方体）的形状可能千奇百怪，由此而划分的三角形（四面体）的品质难以保证。尽管如此，四叉树（八叉树）作为一种数据结构已被广泛应用于阵面推进法和 Delaunay 方法中，以提高查寻效率。

(2) Delaunay 方法。此方法首先是在区域内分布节点，然后采用适当的准则将点连接成四面体单元，生成空间网格。最为常用的准则为球形准则，即一个四面体的外接圆内不包含其他点。该法的优点是方便、速度快，网格的尺寸比较容易控制，但它需要判断物面边界并进行额外处理，对边界的恢复比较困难，很可能造成网格生成的失败。

(3) 阵面推进方法。该方法首先生成背景网格，它是用户自定义的一个包围所感兴趣区域的空间网格，网格内各单元设置为不同的参数来控制单元的形状和大小。然后，生成三维物体的表面网格，从而形成初始阵面，初始阵面是将边界点连接而成的表面网格，边界点由原始数据和背景网格确定，这里要定义初始阵面及其法线方向，以确保阵面向区域内部推进。最后，引入新节点，推进阵面，完成空间网格的生成。该方法的优点是人工干预少，但因空间点是任意给定的，故网格质量较难控制。

由于非结构化网格的生成技术比较复杂，随着人们对求解区域复杂性的不断提高，对非结构化网格生成技术的要求也越来越高。而现有文献反映，非结构化网格生成技术中只有平面三角形的自动生成技术比较成熟，平面四边形网格的生成技术正在走向成熟。其他空间任意曲面的三角形、四边形网格的生成，三维任意几何形状实体的四面体网格和六面体网格的生成技术还不成熟，需要解决的问题还非常多。主要的困难是从二维到三维以后，待划分网格的空间区域非常复杂，除四面体单元以外，很难生成同一种类型的网格，需要各种网格形式之间的过渡，如金字塔形、五面体形等。因此，实际应用时往往将非结构化网格划分技术的各个方法结合起来。非结构化网格技术有待解决的棘手问题有：

- 三维网格生成十分耗时，寻求通用、方便、快速、有效的生成方法是急需解决的；
- 与高精度有限差分格式的结合，三阶以上的高精度格式尚难以应用于非结构化网格的划分。

3.1.3 混合网格

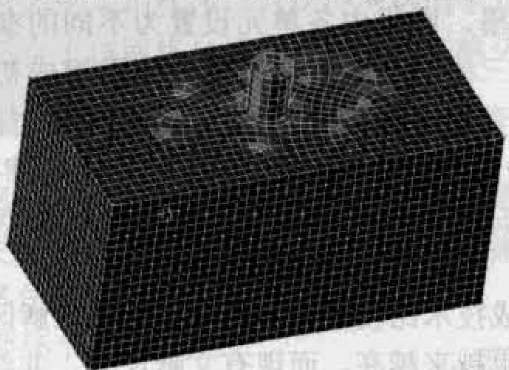
为克服结构化网格和非结构化网格各自的缺点，混合网格技术应运而生，它结合了结构化网格和非结构化网格的优点，已越来越受到重视，其划分方式主要有以下 3 种。

(1) 针对多部件或多体复杂外形的混合网格。此方法是先对多体问题的每一单体或复杂外形的每一部件生成贴体结构网格，而在体与体、部件与部件之间的交界区挖出一个洞，洞内由非结构化网格来填充。这类混合网格的代表有拉链网格（Zipper Grids）和龙形网格（Dragon Grids）等。

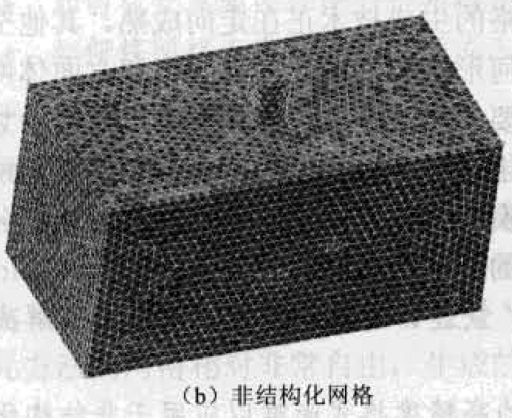
(2) 针对黏性计算的混合网格。该方法是先在物面附近向外划分出几层有一定压缩比的结构网格（二维）或半结构网格（三维、三棱柱）以模拟边界层，其余部分用非结构化网格划分。事实上，在外形不太复杂的情况下，全区域采用三棱柱网格也是可行的。

(3) 矩形与非结构混合网格。矩形网格不必进行 Jacobian 矩阵计算，具有比贴体网格更为简单而快捷的优点。但其不足之处在于不易处理曲面边界，处理不好就会出现所谓的“台阶效应”。事实上，在物面附近采用非结构网格就可以消除“台阶效应”，同时达到模拟复杂外形的目的。这就形成了矩形/非结构混合网格。为了计算黏性问题，亦可在物面附近采用结构（二维）或半结构（三维）网格，然后由非结构网格过渡到外场的矩形网格，由此构成矩形/非结构/半结构混合网格。

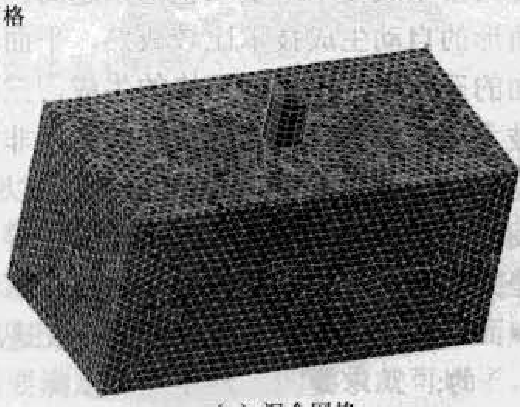
图 3-1 所示为结构化网格划分技术、非结构化网格划分技术与混合网格划分技术对同一模型的网格划分情况，由图中可以清晰看到三种方法划分后的不同网格形态。



（a）结构化网格



（b）非结构化网格



（c）混合网格

图3-1 不同划分方法的网格形态

注意：在网格划分时，应根据实际问题的具体要求，采用优化的网格划分手段。

3.2 网格生成前处理软件 GAMBIT

GAMBIT 是功能强大且灵活方便的几何建模及网格划分工具，可以划分出包含边界层等特殊要求的高质量网格。另外，GAMBIT 还可以实现与 CAD 的衔接，处理复杂的几何模型，并能生成与多个 CFD 软件无缝转接的高质量网格。其网格划分方法的选择实现了完全智能化，当选择一个几何区域后，GAMBIT 会自动选择最合适的网格划分算法，使网格划分过程变得极为容易，其中专有的网格划分算法可以保证在较为复杂的几何区域中直接划分出高质量的六面体网格。

对于 Windows 操作系统，要运行 GAMBIT 软件，必须安装 HummingBird.Exceed 软件以完成系统的虚拟。

3.2.1 GAMBIT 基本界面

GAMBIT 的 GUI 界面可以分为菜单栏、视图窗口、命令显示窗口、命令输入窗口、命令解释窗口、操作面板和视图控制面板 7 个部分，如图 3-2 所示。

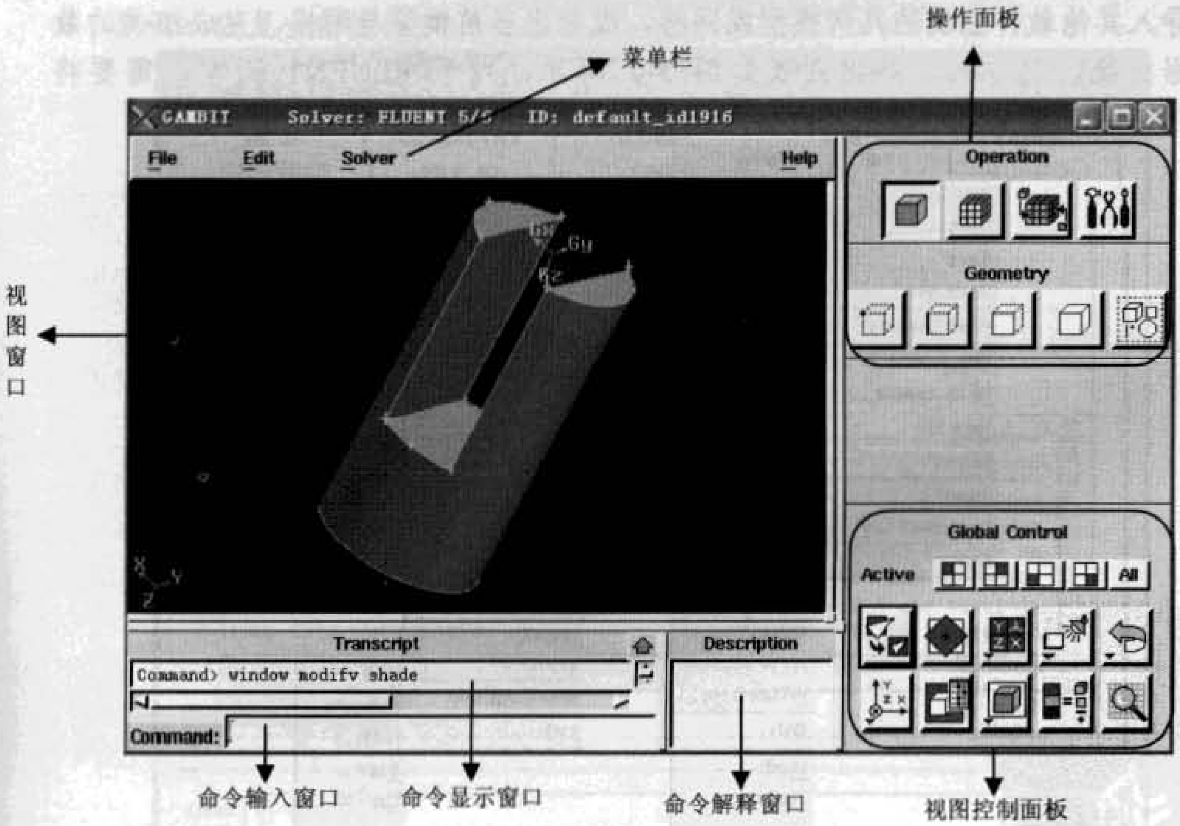


图3-2 GAMBIT 基本界面

(1) 菜单栏：位于标题栏的下方，包含文件、编辑、对象软件和帮助 4 个菜单。图 3-3 所示为文件菜单，通过此菜单可完成下列任务。

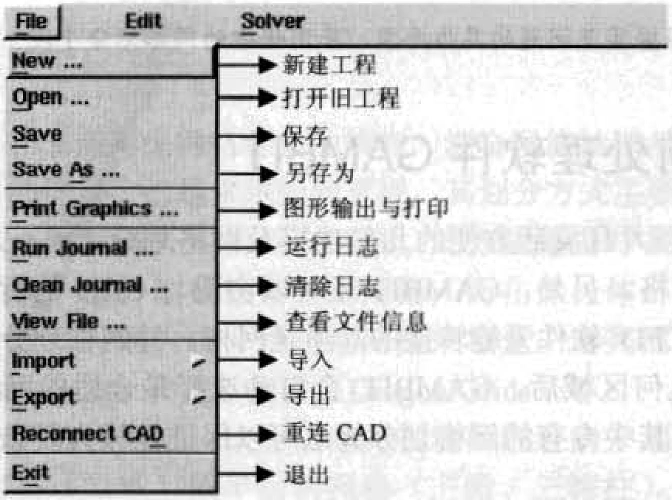


图3-3　文件菜单

- 新建工程或打开已有工程，其识别的文件后缀名为“.dbs”。
- 将当前工程进行保存或另存为操作，保存后在工作目录会生成 3 个文件，后缀名分别为“.jou”、“.trn”和“.dbs”。
- 将当前窗口的图形输出或打印。
- 运行或清除日志，后缀名为“.jou”。
- 查看当前文件的相关信息。
- 导入其他软件生成的几何模型或网格，或导出当前模型与网格，完成相关的数据交换，其导入、导出列表如图 3-4 所示，对于 FLUENT 而言，需要将 GAMBIT 建立好的模型及网格导出为后缀名为.msh 的文件。

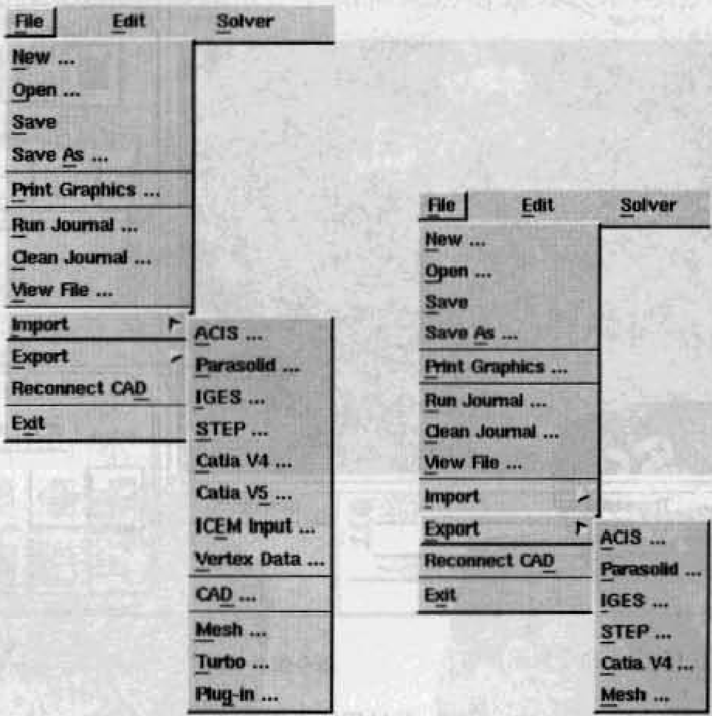


图3-4　GAMBIT 文件菜单的导入与导出列表

- 重新与 CAD 建立连接。
- 退出当前工程。

图 3-5 所示为编辑菜单，通过此菜单的操作可以完成如下任务。



图3-5 编辑菜单

- 编辑标题，即命名当前工程名称。
- 编辑文件信息，如文件名、编者信息等。
- 参数设置，设置相关参数的名称、类型及赋值。
- 查找或修改默认的环境设置。单击图 3-6 所示的窗口，若想改变视图背景色，可选中默认参数窗口中的 GRAPHICS，再从下拉列表中选中 WINDOWS BACKGROUND COLOR 项，其右下方的信息窗口显示当前窗口的背景色为 black，此时可以通过键盘删除 black 而输入 white，而后单击左边的 Modify 按钮完成修改操作，如图 3-7 所示，最后单击最下方的 Close 按钮关闭默认参数窗口，即完成了将黑色背景改为白色的设置。
- 撤销或恢复当前操作步。

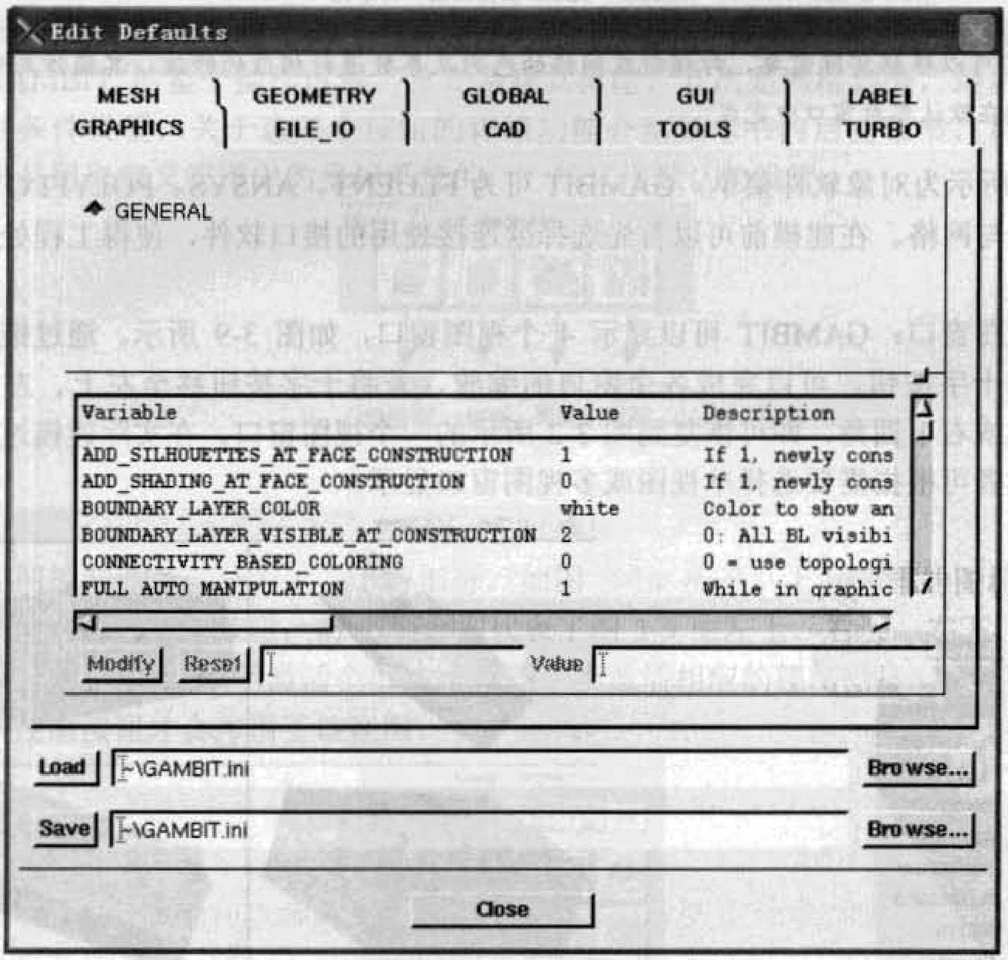


图3-6 默认参数窗口

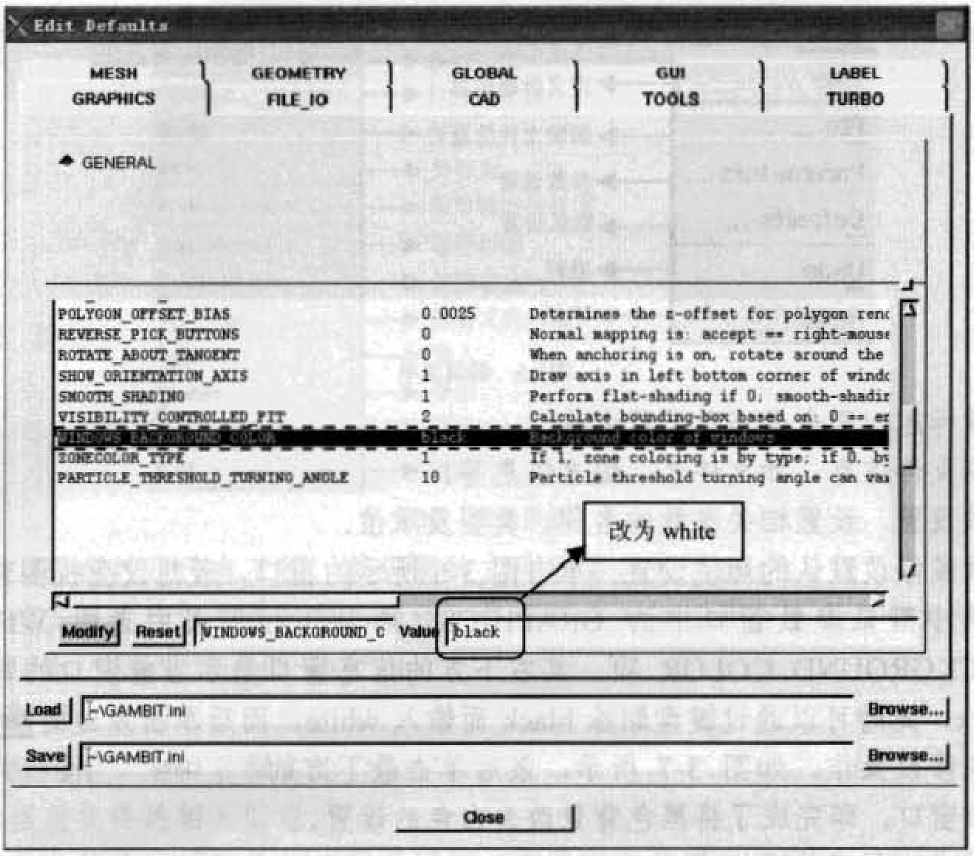


图3-7　设置修改视图窗口背景色

注意：读者还可以根据实际需要，对模型或网格的色彩及参数进行相应的修改，其操作与修改背景色相同，均在默认参数窗口中完成。

图 3-8 所示为对象软件菜单，GAMBIT 可为 FLUENT、ANSYS、POLYFLOW 等主流软件建立模型与网格。在建模前可以首先选择欲连接使用的接口软件，使得工程处理更具针对性。

(2) 视图窗口：GAMBIT 可以显示 4 个视图窗口，如图 3-9 所示。通过拖曳图中的十字按钮，可以完成各个窗口的缩放，若将十字按钮移至左上、左下、右上或右下四角，即可恢复到图 3-2 所示的一个视图窗口。在实际建模过程中，读者可根据需要选择单视图或多视图窗口显示。

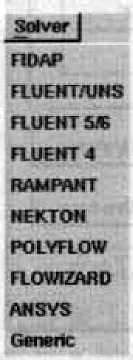


图3-8　对象软件菜单

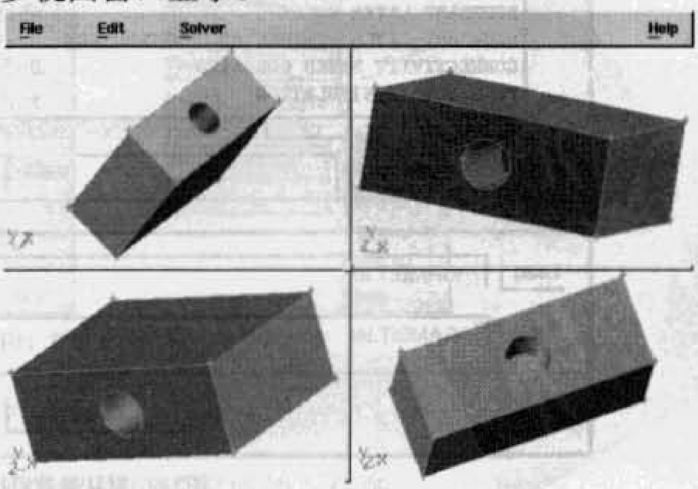


图3-9　多视图窗口

(3) 命令显示窗口：位于视图窗口的左下方，如图 3-10 所示。从该窗口中可以及时查看到每一步操作的命令及结果，帮助用户明确已执行的操作和及时发现存在的问题。

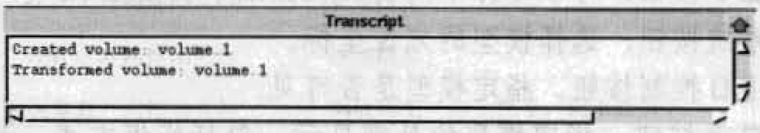


图3-10　命令显示窗口

(4) 命令输入窗口：位于整个 GUI 窗口的最下方，如图 3-11 所示。从 Command 后的输入栏中用户可以通过键盘输入相关命令，以实现相应的操作。



图3-11　命令输入窗口

(5) 命令解释窗口：位于视图窗口的右下角，将鼠标光标移至视图窗口右侧任一操作面板或视图控制面板按钮上，该窗口都会实时出现按钮命令的解释，帮助初学者认识相关操作按钮的功能，如图 3-12 所示。

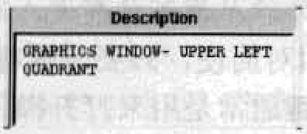


图3-12　命令解释窗口

(6) 操作面板：GAMBIT 的核心部分，通过该面板上的图标按钮，可以完成绝大部分建模和网格划分的工作，如图 3-13 所示。面板的前三个按钮反映了 GAMBIT 的整个操作过程，首先是建立模型，其次是网格划分，最后定义边界条件类型，关于这三个按钮的详细功能介绍见本书的后面章节。第四个按钮是用来定义视图中的坐标系统的，一般采用默认的设置。



图3-13　操作面板

(7) 视图控制面板：分为上、下两部分，如图 3-14 所示。上面一排的图标是视图显示与否的控制按钮，前 4 个分别代表了图 3-9 中左上、右上、左下、右下 4 个视图，All 即表示激活全部 4 个视图。当激活相应的视图图标时，下方的 10 个控制按钮才会作用于该视图。



图3-14　视图控制面板

视图控制面板下方常用的功能按钮的功能介绍如下。

- 全图显示按钮。将视图窗口中的图形缩放至全窗口显示。
- 视图显示按钮。可以选择不同的四视图或单视图显示。
- 坐标系统按钮。选择模型的方位坐标。
- 显示项目控制按钮。指定模型是否可见。
- 外观显示按钮。指定模型的外观显示，包括线框方式、渲染方式和消隐方式等。

3.2.2 GAMBIT 的鼠标用法

GAMBIT 用户界面是为三键鼠标设计的。每个鼠标按键的功能可根据鼠标是在菜单、表格还是在视图窗口上的操作而有所不同。一些在视图窗口上的鼠标操作是和键盘同时进行的。

一、菜单和表格上的使用

GAMBIT 菜单和表格的操作相对简便，只要求鼠标左右键而不涉及到任何键盘操作，其中大部分只需鼠标左键即可。右键通常是用来打开操作面板上功能按钮的下拉列表，如图 3-15 所示。在一些表格上包含文本窗口，右键还可以打开选项的隐藏菜单。

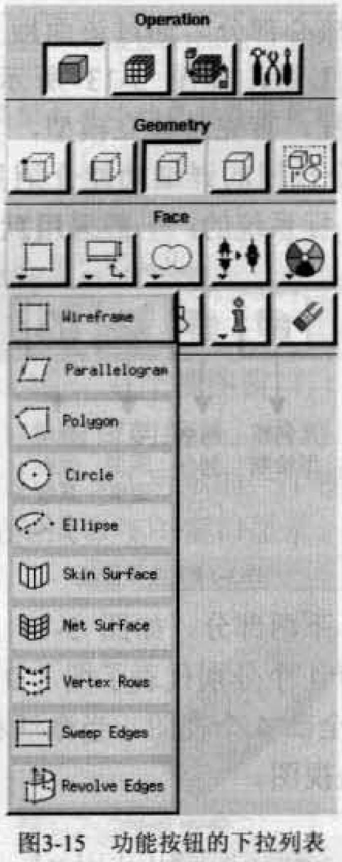


图3-15　功能按钮的下拉列表

二、视图窗口上的使用

在视图窗口上，通过鼠标主要完成显示操作、任务操作和点的创建 3 类操作。

(1) 显示操作。通过鼠标 3 个键及键盘上的 Ctrl 键可以完成 GAMBIT 视图窗口中的显示操作，如表 3-1 所示。

表3-1　　鼠标完成的显示操作

鼠标/键盘按键	鼠标协同操作	描述
左键单击	往任一方向拖动光标	旋转模型
中键单击	往任一方向拖动光标	移动模型
右键单击	往垂直方向拖动光标	缩放模型（向上缩小，向下放大）
右键单击	往水平方向拖动光标	使模型绕着图形窗口中心旋转
Ctrl+左键	光标对角移动	放大模型，保留模型比例。释放鼠标按键后，显示了放大的模型
两次中键单击		在当前视角直接显示模型

(2) 任务操作。利用 3 个鼠标按键和键盘上的 Shift 键可以帮助用户完成 GAMBIT 视图窗口的任务操作，包括选中实体和执行动作。

在 GAMBIT 建模和网格划分时通常要求用户指定一个或更多的实体操作，有两种方法可用于指定一个实体。

- 在指定表格中的列表框中输入实体名字或从列表中挑选一个。
- 用鼠标直接在视图窗口模型中选中实体。

当使用鼠标从显示在视图窗口的模型中选择一个实体时，GAMBIT 会把该实体的名字插入当前活动的列表中。

GAMBIT 实体选中操作有两种不同的类型，都用到了 Shift 键。两种选中实体的操作说明如表 3-2 所示。

表3-2　　鼠标+键盘完成的任务操作

鼠标/键盘按键	鼠标协同操作	描述
Shift+左键	光标选择模型	选中模型或模型的几何元素
Shift+中键	光标选择模型	在给定类型的相邻实体间切换
Shift+右键	于当前窗口	执行动作操作，等同于单击 Apply 按钮

注意：Shift+左键可以同时选中一组目标，只需拖出一个方框包围被选目标，或按住 Shift 键，用左键逐个单击被选目标。

(3) 点的创建。利用鼠标在视图窗口中可以进行点的创建，通常为快捷创建已知坐标点，其具体操作步骤如下。

- 打开视图坐标定义工具 的操作面板。
- 单击坐标系操作按钮 。
- 选择坐标网格显示按钮 ，如图 3-16 所示。



图3-16　定义视图坐标系统工具的操作面板

- 在弹出的坐标网格定义面板中，分别设置 x、y 轴输入区间范围及坐标网格的间距，如图 3-17 所示，单击 Update list 按钮，即可在 XY_plane 中显示定义好的坐标节点值，最后单击 Apply 按钮完成坐标网格的定义，并在视图窗口中生成了如图 3-18 所示的坐标网格。
- 按次序单击 → → ，使得当前执行点生成操作。
- 在坐标网格的适当位置，利用 Ctrl+鼠标右键即可创建点，如图 3-19 所示。

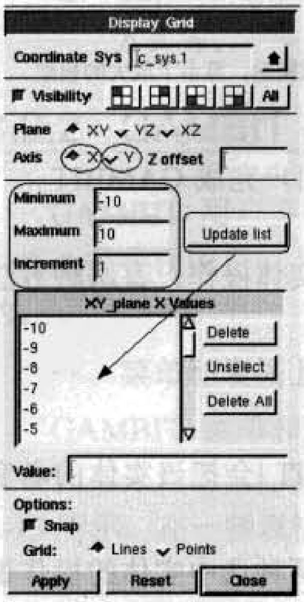


图3-17 坐标网格定义面板

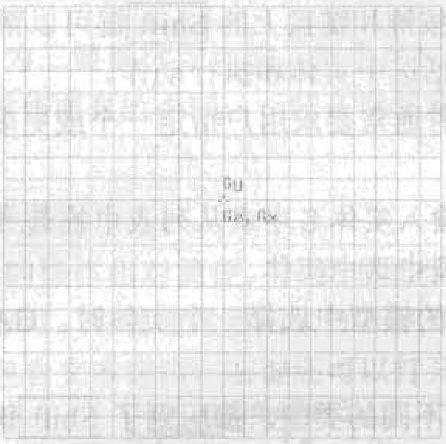


图3-18 生成的坐标网格

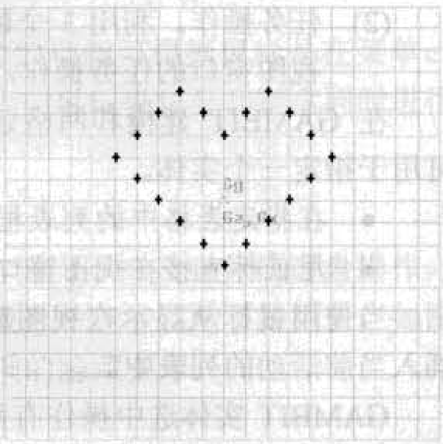


图3-19 进行点创建后的坐标网格

3.2.3 GAMBIT 几何建模

几何模型建立通常为点→线→面→体的顺序，单击 按钮，即可弹出如图 3-20 所示的几何建模工具面板，通过该面板的功能按钮可完成 GAMBIT 的建模任务。

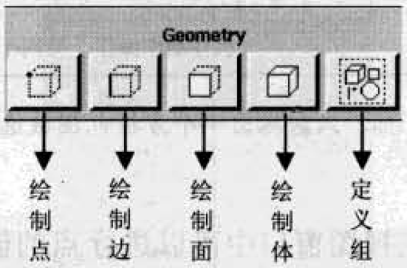


图3-20 几何建模工具面板

一、绘制点

单击 按钮即弹出如图 3-21 所示的 Vertex 面板，用户只需在 Create Real Vertex 面板中输入点的三维坐标，单击 Apply 按钮后即可在视图窗口中生成相应的点。对于一个复杂的几何模型，读者可先计算出全部点的坐标，然后依次通过此方法生成所有的点。

点的生成形式有 7 种，鼠标右键单击 按钮，可查看其列表，如图 3-22 所示。由上至下依次为根据坐标生成点、在线上生成点、在面上生成点、在体上生成点、由交点生成点、由质心生成点和投影生成点，读者可根据实际需要选择相应的点生成方式。

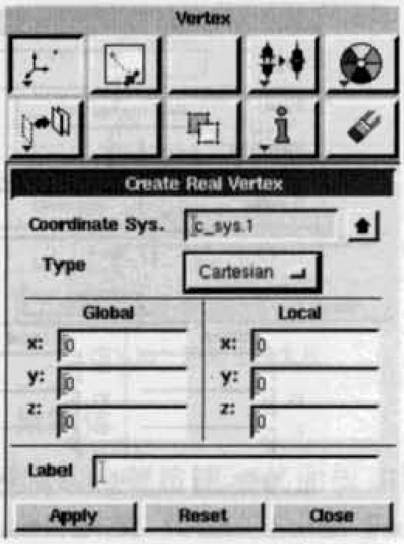


图3-21　Vertex 面板

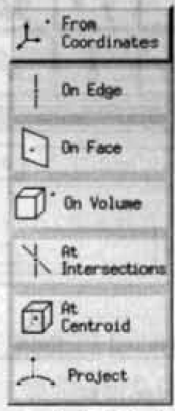


图3-22　点生成方式列表

在 Vertex 面板中还有几个常用的命令，如 Move/Copy 命令。单击按钮弹出如图 3-23 所示的面板，单击 Vertices 右侧输入栏呈高亮黄色显示时，读者可以选取需要移动或复制的点，通过平移、旋转、映射等方法完成点的移动或复制。

GAMBIT 中除了 Shift+鼠标左键单击可以选中对象外，还可以单击黄色输入栏右侧的向上箭头，在弹出的清单列表里选择待选对象，如图 3-24 所示。

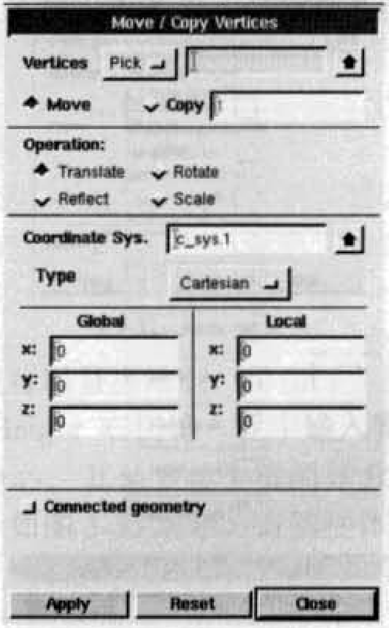


图3-23　移动/复制点面板

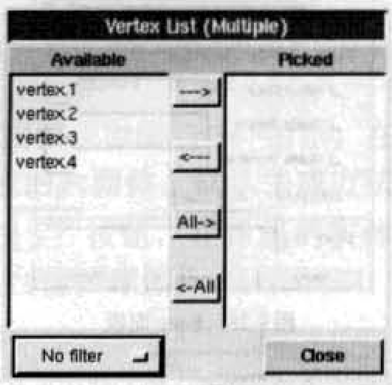


图3-24　已生成点的清单

二、绘制线

单击 Geometry 面板的第二个按钮，弹出如图 3-25 所示的 Edge 面板，读者可以在 Create Straight Edge 的黄色输入栏中选取需要连接成直线的两点，单击 Apply 按钮就会在选择的两点间建立一条直线。

除直线外，还有很多其他形式的线可以被绘制，只需右键单击按钮，则弹出如图 3-26 所示的线生成方式列表，有圆弧、圆、椭圆、倒角、二次曲线、样条曲线等。

与 Vertex 面板不同，Edge 面板中有分离按钮，其面板如图 3-27 所示，读者可以利用该命令将一条线分割成两条，分割方法有坐标点切割、已知点切割和线切割 3 种。

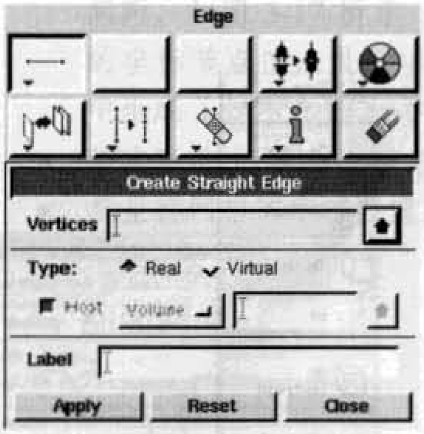


图3-25 Edge 面板



图3-26 线生成方式列表

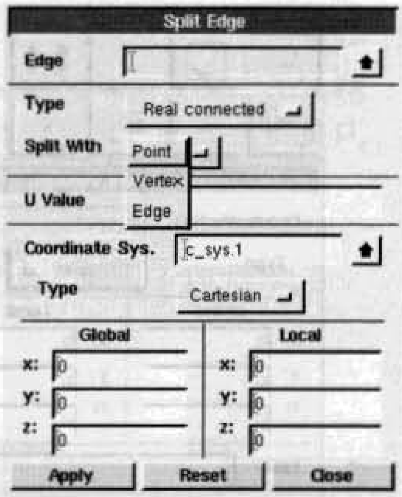


图3-27 线分段面板

三、绘制面

单击按钮，可以进行面的绘制，其面板如图 3-28 所示。与直线生成方式类似，由线框生成面方法只需读者在 Create Face from Wireframe 的黄色输入栏中选取欲围成面的线段，单击 Apply 按钮即可。

鼠标右键单击按钮同样会弹出其他面生成方式列表，如图 3-29 所示。除线框围成面外，还有三点生成平行四边形面、三点生成圆面、三点生成椭圆面、多点生成多边形面、线扫掠成面、线旋转成面等。

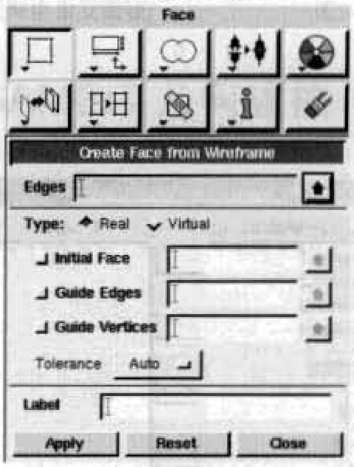


图3-28 Face 面板



图3-29 面生成方式列表

注意： *由线框生成面方法中所选取的线段必须是封闭的。扫掠成面可根据给定路径，也可根据轮廓曲线生成扫掠面。*

除了由点→线→面或由点→面的生成方法外，读者还可以直接绘制面，单击 Face 面板上排第二个按钮，即可弹出矩形生成面板，如图 3-30 所示。在宽、高输入栏中输入相应的数值，即可生成矩形，其默认的生成方法是以原点为中心的。读者还可根据需要以其他方式生成，只需右键单击矩形生成面板中的 XY Centered 按钮选取相应的生成方式即可。

除可直接生成矩形外，还可以生成圆与椭圆，鼠标右键单击按钮即弹出如图 3-31 所示的样式列表。对于简单规则的平面，直接生成比从点开始绘制方便得多，大大节约了建模的时间。

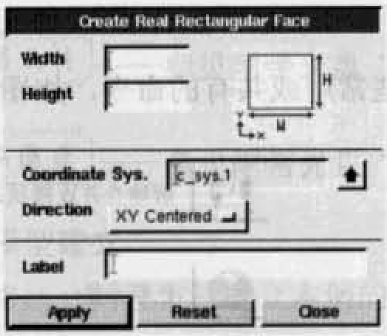


图3-30 矩形生成面板

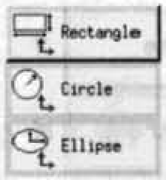


图3-31 实面样式列表

四、绘制体

为体绘制按钮，其面板如图 3-32 所示。默认生成体的方法是由面缝合成体，即 Stitch Faces 方法，只需在 Stitch Faces 面板的黄色输入栏内选取要缝合成体的所有面，单击 Apply 按钮即可。除此方法外，还有扫掠成体、旋转成体和在现有拓扑结构上生成体三种方法，鼠标右键单击按钮即可弹出隐藏这三种方法的体生成方式列表，如图 3-33 所示。

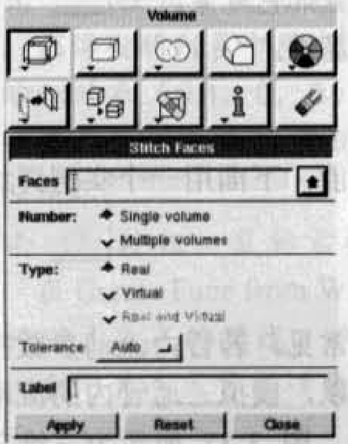


图3-32 Volume 面板



图3-33 体生成方式列表

体也可以直接绘制，单击按钮弹出六面体生成面板，如图 3-34 所示。在 Width、Depth、Height 右侧输入栏中输入宽、长、高即生成对应的六面体，默认生成方法仍然是以原点为中心。其他直接生成的体方式可用鼠标右键单击按钮，在弹出的实体样式列表中选择，如图 3-35 所示，有圆柱体、棱柱体、棱锥体、台体、球体等。

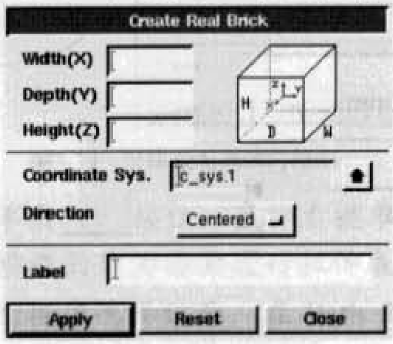


图3-34 六面体生成面板

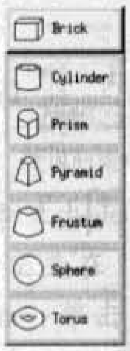


图3-35 实体样式列表

注意：二维建模主要遵循点、线、面的原则，而三维建模需利用视图、布尔运算及 CAD 等其他辅助建模工具。

五、其他常用操作

除上述点、线、面、体的建模操作命令外，还有一些常用或共有的命令，如图 3-36 所示。

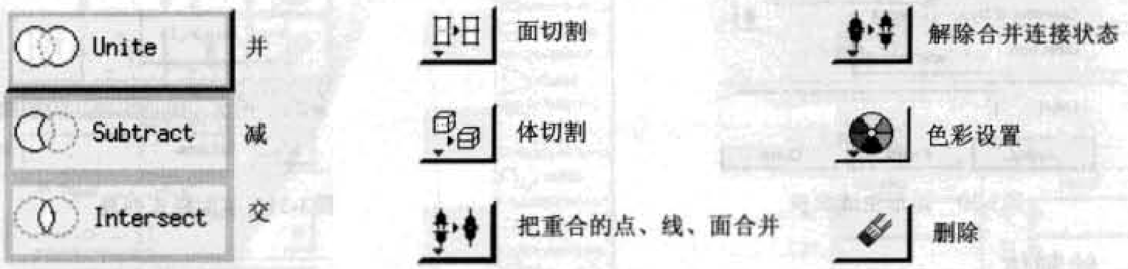


图3-36　其他常用建模操作按钮说明

- 在面和体的建立过程中，布尔运算经常被用到，主要为取并集、交集和一个面或体减去另一个面或体 3 种方式。
- 与 Split Edge 一样，对于面和体也可以进行切割。
- 对于重合的点、线、面常需将其合并，以方便边界类型的定义。
- 若觉得默认的色彩不合适时，读者还可以自行设置配色方案。
- 对错误的或无用的模型，读者可以删除，以避免混淆。

【实例 3-1】：几何建模实例

为演示已讲述的 GAMBIT 点、线、面、体的建模功能，下面用一个实例详细介绍模型的建立过程。

一、实例概述

三通管在城镇输水管网、输油管网、输气管网中均较常见，若管内流动参数控制不合理或接头安装位置不到位，则容易导致管路振动和穿透，所以，模拟三通管内的流动可以较好地得知相关流动参数的变化，为实际设计和安装提供依据。图 3-37 所示为三维三通管，管径为 800mm，左侧为长 10m 的干管，在干管中间位置有一长 5m 的横支管，下面介绍其建模过程。

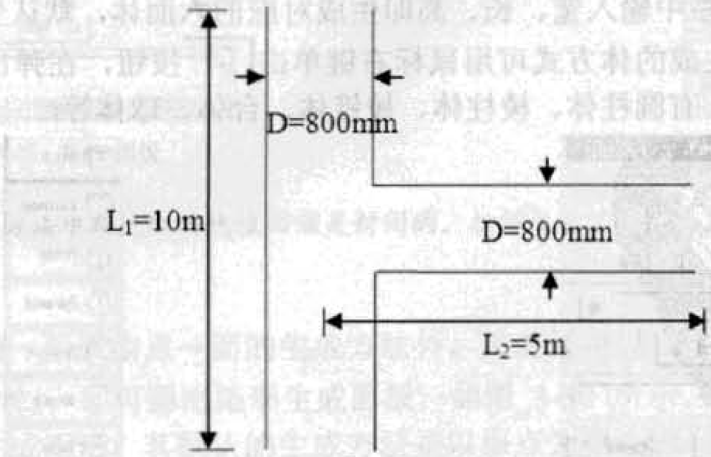


图3-37　三维三通管描述

思路分析

本例可以遵循点→线→面→体的建模过程，也可以直接建立体模型。

结果文件——参见附带光盘“Ch3\sl3-1.dbs”、“Ch3\sl3-1.jou”、“Ch3\sl3-1.trn”。

动画演示——参见附带光盘“Ch3\AVI\sl3-1.avi”。

二、模型建立

下面将结合两种方法建立本例的几何模型，用第一种方法建立主干管，第二种方法建立横支管。

1. 通过“点→线→面→体”的建模过程，建立主干管。

(1) 打开 GAMBIT，单击控制面板中的点绘制按钮，在 Create Real Vertex 面板中输入坐标点（0.4，0，0），该点为三通管管壁上一点，如图 3-38 所示。

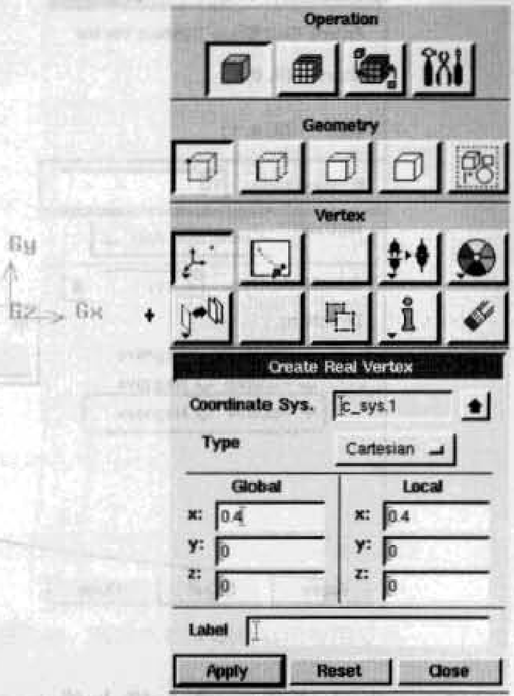


图3-38　管壁上单点的绘制

(2) 单击按钮，鼠标右键单击按钮，在弹出的列表中单击按钮，以刚才绘制的点（0.4，0，0）为源点，绕 z 轴一圈，生成一条管横截面周线，如图 3-39 所示。

(3) 单击按钮，鼠标右键单击按钮，在 Create Face from Wireframe 面板中选择刚才生成的周线，单击 Apply 按钮，利用其生成管道横截面，如图 3-40 所示。

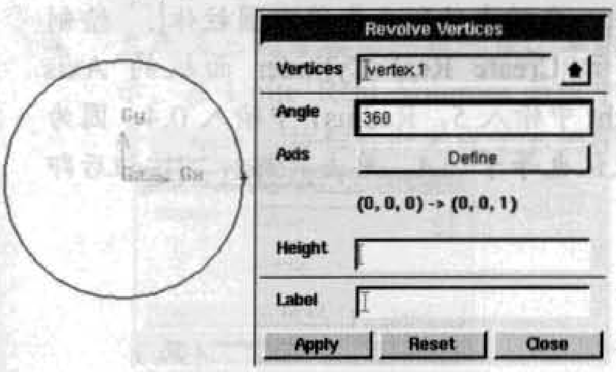


图3-39　管横截面周线的绘制

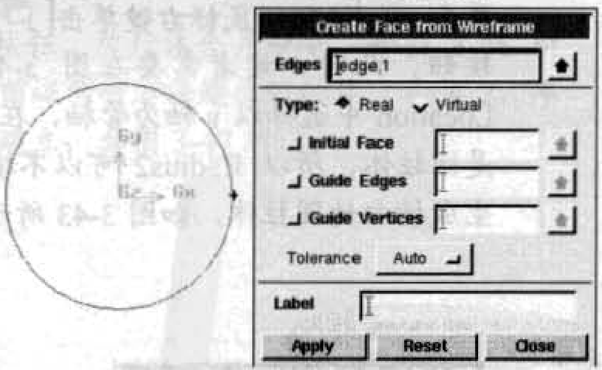


图3-40　生成的横截面

(4) 单击按钮，鼠标右键单击按钮，在弹出的列表中单击按钮，以管横截面作为源面进行拉伸成体的操作。如图 3-41 所示，首先在 Sweep Faces 面板中选择该面，在 Path 路径中选择方向矢量方式 Vector，单击 Define 按钮，弹出 Vector Definition 面板，选中 z 方向为方向矢量，在 Magnitude 中输入 10，表示向 z 方向拉伸 10m，单击两次 Apply 按钮，关闭两个面板后即生成拉伸后的体。

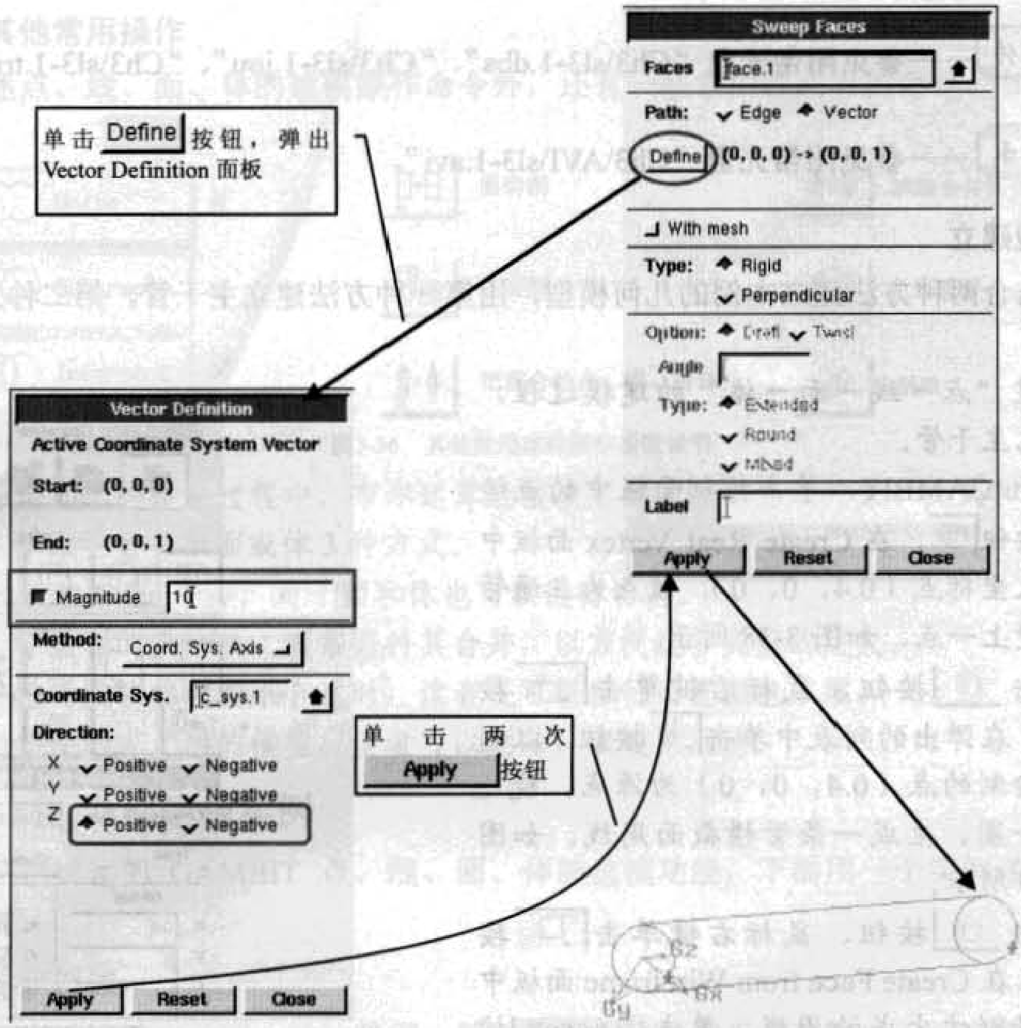


图3-41 面拉伸生成体

2. 直接建体，建立横支管。

单击 按钮，鼠标右键单击 按钮，在弹出的列表中单击圆柱体 绘制按钮。此时，读者需要在图 3-42 所示 Create Real Cylinder 面板的 Axis Location 中选择以 *y* 轴为管轴，在 Height 中输入 5，Radius1 中输入 0.4，因为是圆柱体，所以 Radius2 可以不填，默认也等于 0.4，单击 Apply 按钮后即生成横向的圆柱体，如图 3-43 所示。

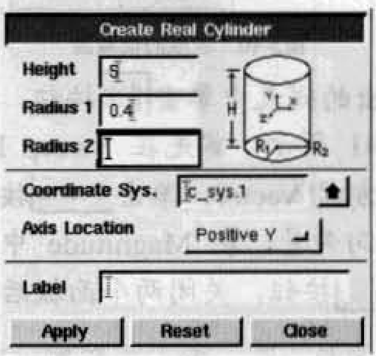


图3-42 圆柱体绘制面板



图3-43 生成的横向圆柱体

注意：除了可以利用方向矢量定义面拉伸成体外，还可以绘制一条线，让面沿着线拉伸成体，读者可根据需要自由选择。

3. 下面将横向圆柱体向 z 轴正向移动 5m，单击按钮，在 Move/Copy Volumes 面板黄色输入栏中选取横向圆柱体（即 volume2），在 z 方向偏移量的输入栏内输入 5，如图 3-44 所示。最后，单击 Apply 按钮，即完成了移动，如图 3-45 所示。

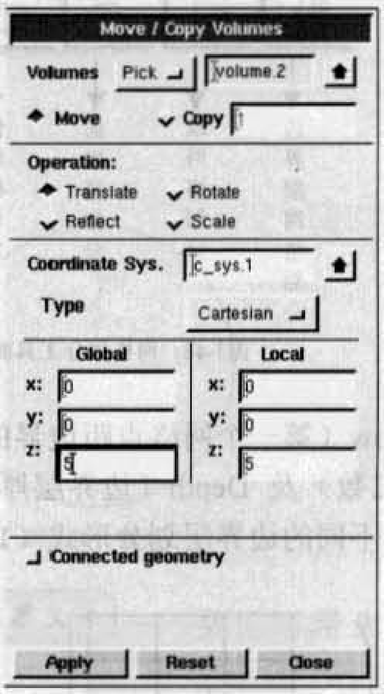


图3-44 横向圆柱体的移动操作

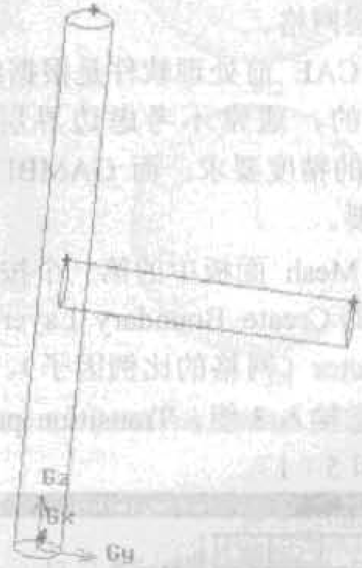


图3-45 横向圆柱体移动后的视图显示

注意：实体除了可以按方向移动外，还可以定义旋转轴，进行一定角度的旋转。

4. 至此离三通管模型还差一步，单击按钮，执行体合并命令。如图 3-46 所示，在 Unite Real Volumes 面板中选取前述两种方法建立好的体 1 和体 2，单击 Apply 按钮后即完成了本例模型的建立，如图 3-47 所示。

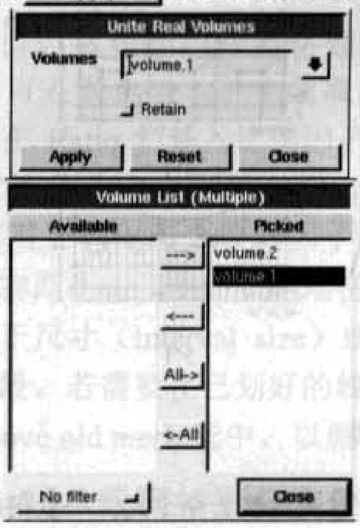


图3-46 体合并操作

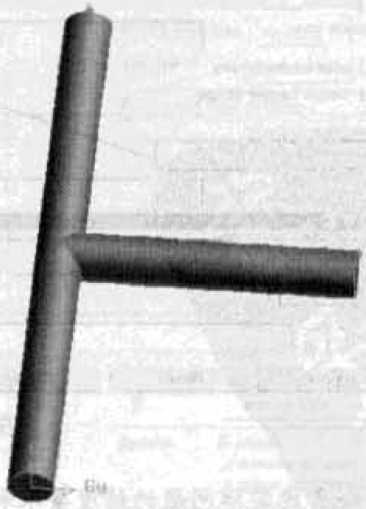


图3-47 建立好的三通管模型

3.2.4 GAMBIT 网格划分

通过操作面板第二个按钮，可以完成网格的划分任务，其 Mesh 工具面板如图 3-48 所示。

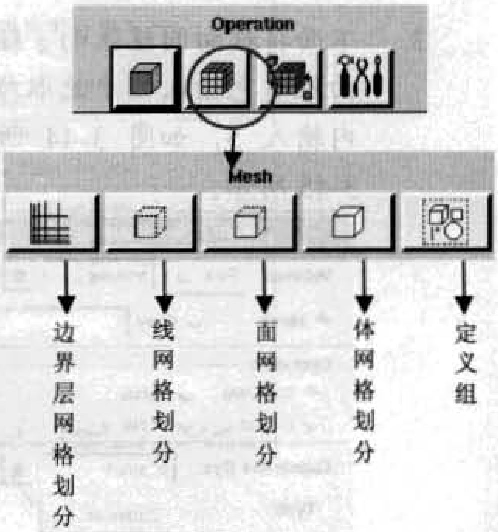


图3-48 网格划分工具面板

3.2.4.1 边界层网格划分

由于流体具有粘性，精度要求较高时需对计算网格进行特殊处理，即进行边界层网格的划分。近壁面粘性效应明显及流场参数变化梯度较大的区域都应该划分边界层网格。

一般 CAE 前处理软件是根据结构强度分析的需要而设计的，通常不考虑边界层，因此难以满足 CFD 计算的精度要求，而 GAMBIT 很好地满足了这一特殊需要。

单击 Mesh 面板中的第一个按钮，弹出如图 3-49 所示的 Create Boundary Layer 面板，需要在 First row（第一个网格点距边界的距离）、Growth factor（网格的比例因子）、Rows（边界层网格点数）及 Depth（边界层厚度）四组参数中任意输入 3 组，Transition pattern 选项提供了 4 种不同的边界层划分形式（1：1、4：2、3：1 和 5：1）。

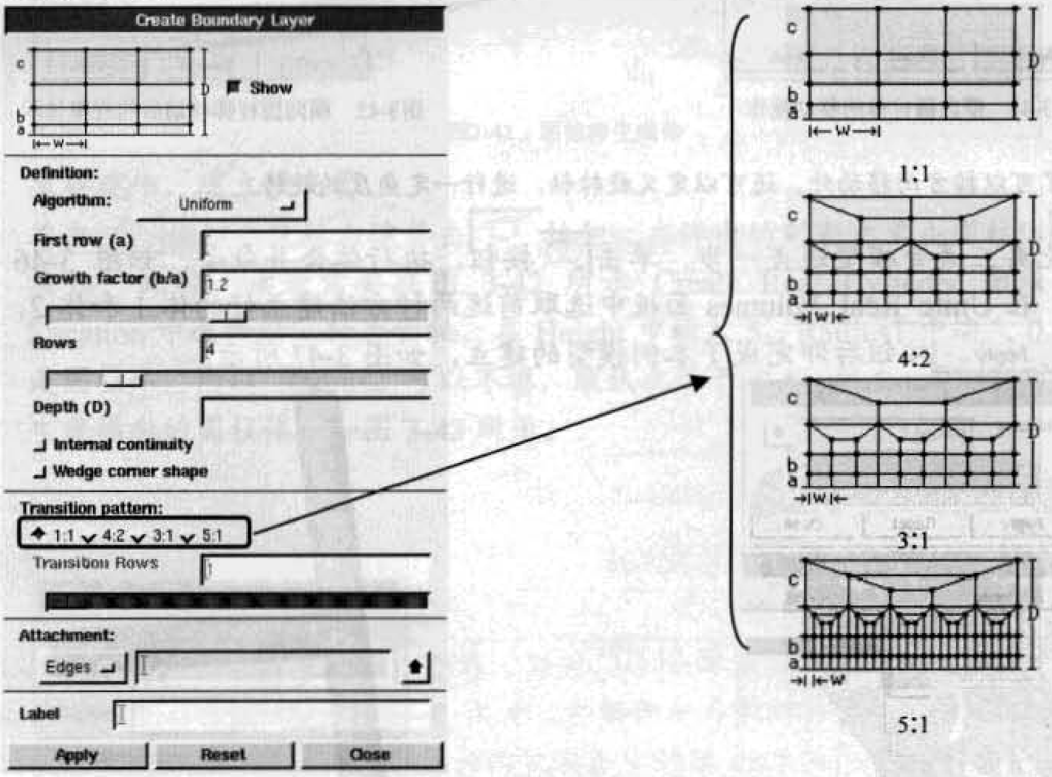


图3-49 边界层面板及边界层类型

注意：应综合考虑实际问题的精度要求和配件条件，选择合适的边界层网格划分方式，一般问题选 1:1 即可。

【实例 3-2】：边界层网格划分实例

由于运动流体接近壁面处的速度梯度最大，所以在管输时常需在近壁面进行网格细化，即划分边界层网格。对图 3-50 所示的圆面进行边界层网格划分，在 Create Boundary Layer 面板的 First row 栏输入 0.005，Growth factor 栏输入 1.2，Rows 栏输入 10，分别采用四种不同形式的边界层划分类型，得出的边界层网格如图 3-51 所示。

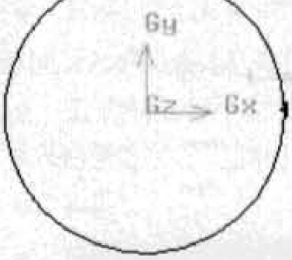


图3-50 圆面

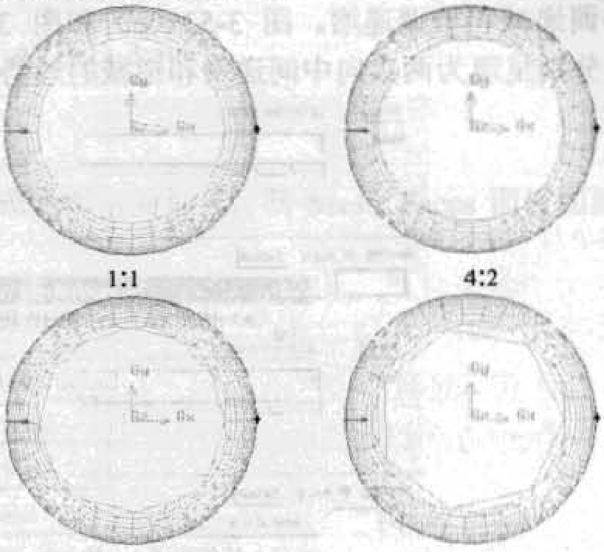


图3-51 不同形式划分圆面的边界层网格

结果文件——参见附带光盘“Ch3\sl3-2-a.dbs”、“Ch3\sl3-2-a.jou”、“Ch3\sl3-2-a.trn”、“Ch3\sl3-2-b.dbs”、“Ch3\sl3-2-b.jou”、“Ch3\sl3-2-b.trn”、“Ch3\sl3-2-c.trn”、“Ch3\sl3-2-c.dbs”、“Ch3\sl3-2-c.jou”、“Ch3\sl3-2-d.trn”、“Ch3\sl3-2-d.dbs”、“Ch3\sl3-2-d.jou”。

动画演示——参见附带光盘“Ch3\AVI\sl3-2.avi”。

3.2.4.2 线网格划分

单击 按钮弹出线网格划分面板，如图 3-52 所示。读者可在黄色输入栏中选取一条或多条待划分的线段，而后在 Ratio 栏输入比例因子，可以单调递增或单调递减，默认值为 1，即均匀分布。若同时选中 Double sided，则需要输入两个比例因子，使得划分出来的网格呈现中间密两端疏或中间疏两端密的形式。实际划分时，通常可基于尺寸（Interval size）或段数（Interval count）将线段分段。若需要在已划好的线段上重新划分网格，需要将 Remove old mesh 选中，以删除先前的网格。

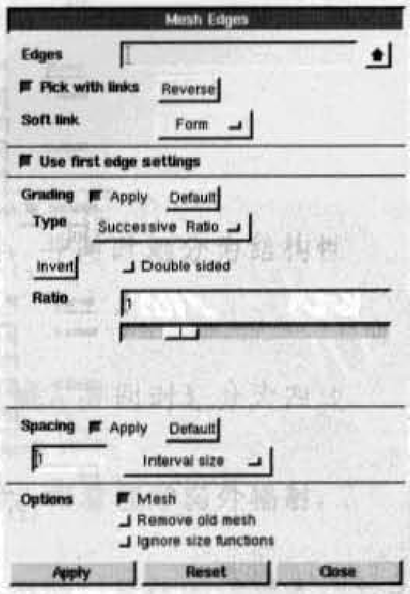
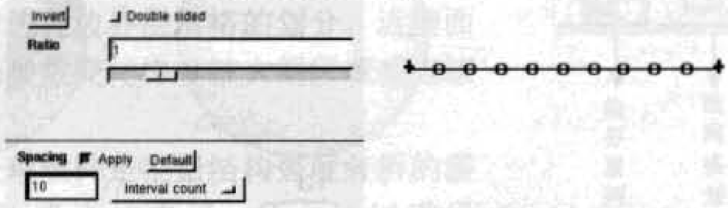


图3-52 线网格划分面板

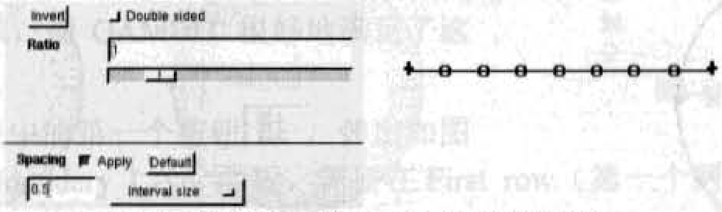
【实例 3-3】：线网格划分实例

对一条 4m 长的线段进行线网格划分，通过改变

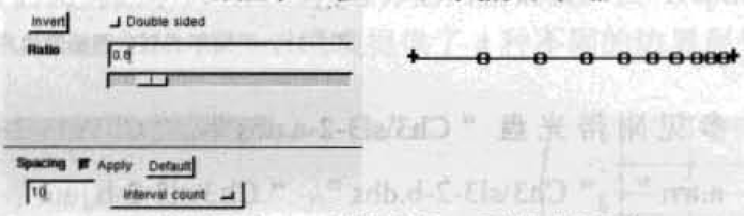
Ratio 比例因子与 Interval count 或 Interval size 划分法，得到不同形式的线网格形状，如图 3-53 所示。图 3-53（a）和图 3-53（b）所示为改变划分方法得出的线网格，基于段数 Interval count 的划法最简单，只需读者定义划分为多少段的段数即可，而尺寸 Interval size 划法需要读者预先估计网格的大小尺寸，作相应计算后得出每段尺寸的大小，然后输入对应的数值。图 3-53（c）和图 3-53（d）所示为通过改变比例因子划分出的线网格，网格分别呈现为单调递减和单调递增。图 3-53（e）和图 3-53（f）所示为双比例因子设置划出的网格，网格分别呈现为两头向中间递增和递减的趋势。



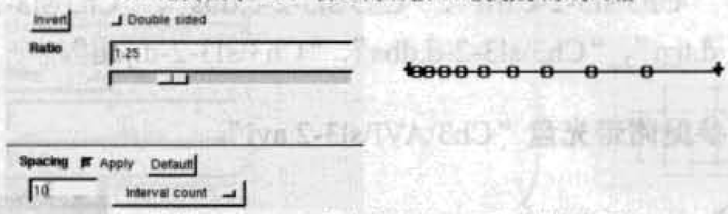
（a）比例因子 1，按 10 段划分的线网格



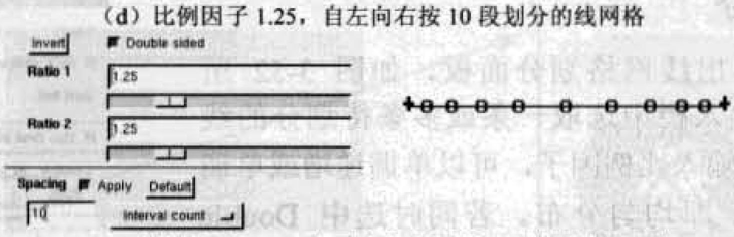
（b）比例因子 1，按 0.5m 尺寸划分的线网格



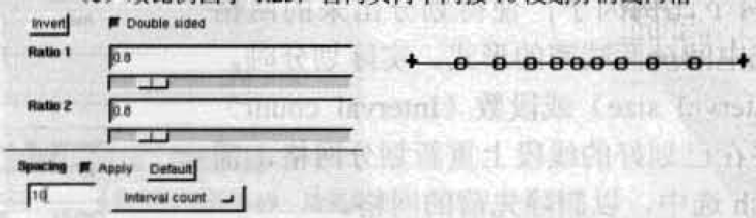
（c）比例因子 0.8，自左向右按 10 段划分的线网格



（d）比例因子 1.25，自左向右按 10 段划分的线网格



（e）双比例因子 1.25，自两头向中间按 10 段划分的线网格



（f）双比例因子 0.8，自两头向中间按 10 段划分的线网格

图3-53　不同方法划分出的线网格

结果文件——参见附带光盘“Ch3\sl3-3-a.dbs”、“Ch3\sl3-3-a.jou”、“Ch3\sl3-3-

a.trn"、"Ch3\sl3-3-b.dbs"、"Ch3\sl3-3-b.jou"、"Ch3\sl3-3-b.trn"、"Ch3\sl3-3-c.dbs"、"Ch3\sl3-3-c.jou"、"Ch3\sl3-3-c.trn"、"Ch3\sl3-3-d.dbs"、"Ch3\sl3-3-d.jou"、"Ch3\sl3-3-d.trn"、"Ch3\sl3-3-e.dbs"、"Ch3\sl3-3-e.jou"、"Ch3\sl3-3-e.trn"、"Ch3\sl3-3-f.dbs"、"Ch3\sl3-3-f.jou"、"Ch3\sl3-3-f.trn"。

动画演示——参见附带光盘"Ch3\AVI\sl3-3.avi"。

3.2.4.3 面网格划分

通过 Mesh 面板第三个按钮 可完成面网格的划分，其 Mesh Faces 面板如图 3-54 所示。

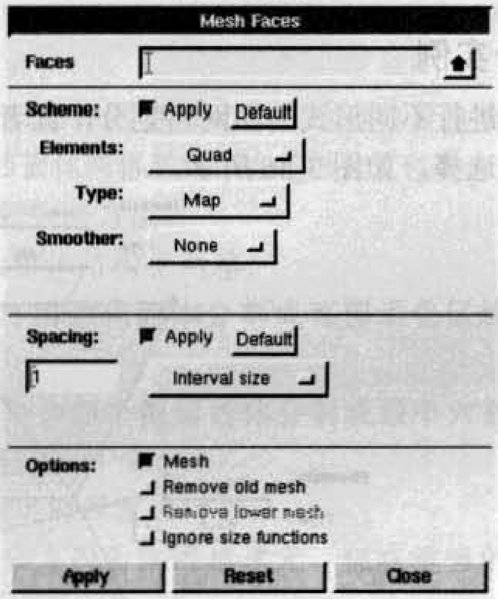


图3-54 面网格划分面板

面板中的 Elements 提供了 3 种面网格划分类型。

- Quad：四边形网格形式。
- Tri：三角形网格形式。
- Quad/Tri：四边形网格和三角形网格混合的形式。

面板中的 Type 中提供了 5 种网格划分的方法。

- Map：将区域划分为四边形的结构性网格。
- Submap：将一个不规则的区域划分为几个规则的区域，并同时划分为结构性网格。
- Pave：将区域划分为非结构性网格。
- Tri Primitive：将一个三角形区域划分为 3 个四边形区域，并同时划分为四边形网格。
- Wedge Primitive：在一个楔形的尖端划分为三角形网格，沿着楔形向外辐射，划分为四边形网格。

虽然有这么多的网格划分方法，但并不适用于所有的网格类型，具体的适用类型如表 3-3 所示。

表3-3　　面网格划分方法适用的网格类型

划分方法	适用类型 Quad	Tri	Quad/Tri
Map	√		√
Submap	√		
Pave	√	√	√
Tri Primitive	√		
Wedge Primitive			√

注意：读者在进行面网格划分时，一定要依据各划分方法适用的类型，否则将提示网格划分失败。

【实例 3-4】：面网格划分实例

对图 3-55 所示的几个面进行不同形式的面网格划分，读者只需在 Mesh Faces 面板中的 Elements 和 Type 进行相应的选择，如图 3-56 所示。

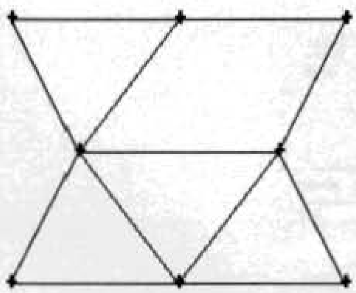


图3-55　待划分的几何面

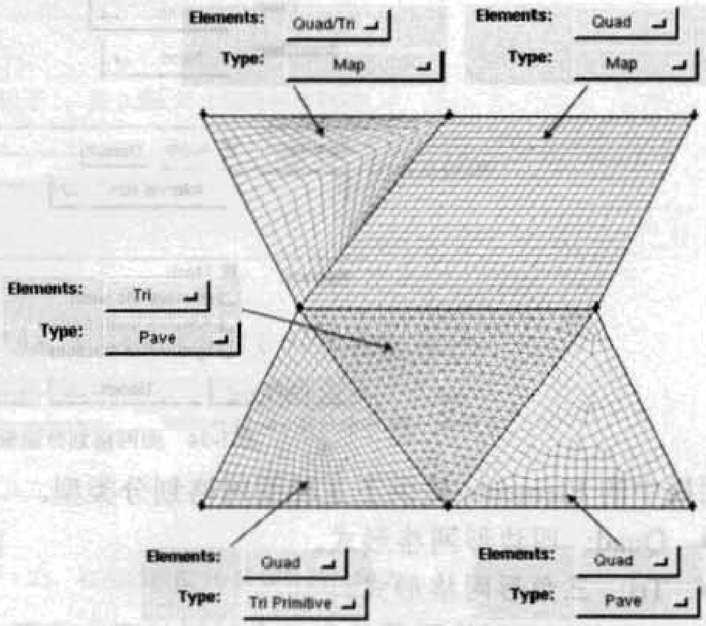


图3-56　不同方法划分出的面网格

对于四边形面，通常采用的是 Quad 单元与 Map 或 Submap 结合的划分方法。而对于三角形面，采用的方法较多，可以用 Quad 单元与 Pave 或 Tri Primitive 结合的方法，也可以用 Quad/Tri 单元与 Map 结合的方法，还可以用 Tri 单元与 Pave 结合的划分方法，读者可根据实际计算精度与网格疏密要求进行选择。

结果文件——参见附带光盘“Ch3\sl3-4.dbs”、“Ch3\sl3-4.jou”、“Ch3\sl3-4.trn”。

动画演示——参见附带光盘“Ch3\AVI\sl3-4.avi”。

3.2.4.4　体网格划分

单击 Mesh 面板中的第四个按钮 将弹出体网格划分面板，如图 3-57 所示。

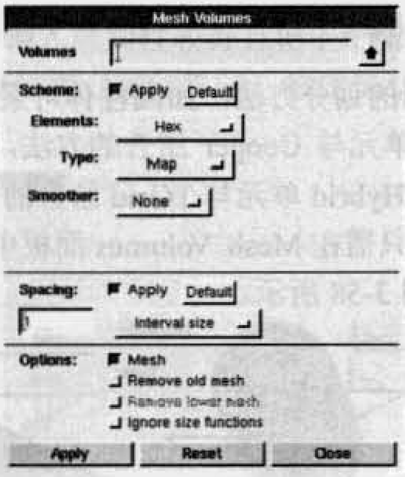


图3-57 体网格划分面板

与面网格划分面板类似，Mesh Volumes 面板中的 Elements 提供了 3 种体网格划分类型。

- Hex：六面体网格形式。
- Hex/Wedge：主要以六面体网格形式，在适当位置包含楔形网格。
- Tet/Hybrid：主要以四面体网格形式，在适当位置包含六面体、锥形和楔形网格。

Type 中提供了 6 种网格划分的方法。

- Map：将体划分为六面体结构化网格。
- Submap：将一个不可图示化的体分割成可图示化区域，并将每个区域划分为六面体结构化网格。
- Tet Primitive：将一个含四个侧面的体分割成四个六面体区域，并将每个区域划分为可图示化网格。
- Cooper：将体按照指定的源面进行划分。
- TGrid：将体主要划分为四面体网格单元，但在适当的位置可以包含六面体、锥体和楔形单元。
- Stairstep：划分为六面体网格，并生成一个与原始体积形状近似的平滑的体。

上述方法具体的适用类型如表 3-4 所示。

表3-4 体网格划分方法适用的网格类型

划分方法	适用类型		
	Hex	Hex/Wedge	Tet/Hybrid
Map	√		
Submap	√		
Tet Primitive	√		
Cooper	√	√	
TGrid			√
Stairstep	√		

注意：体网格划分与面网格一样，一定要依据各划分方法适用的类型，不能混乱组配，否则划出的网格质量得不到保证。

【实例 3-5】：体网格划分实例

对不同的几何体可采用不同的划分方法，如圆柱体可采用 Hex 单元与 Cooper 结合的方法，圆台体可采用 Hex/Wedge 单元与 Cooper 结合的方法，六面体可采用 Hex 单元与 Map 结合的方法，锥台体可采用 Tet/Hybrid 单元与 TGrid 结合的方法，四面体可采用 Hex 单元与 Tet Primitive 结合的方法，读者只需在 Mesh Volumes 面板中的 Elements 和 Type 进行相应的选择即可，划分出的体网格如图 3-58 所示。

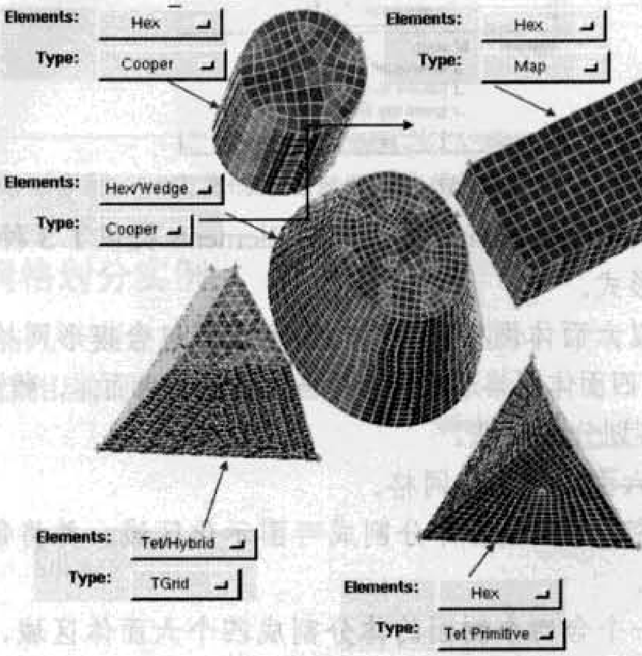


图3-58　不同方法划分出的体网格

结果文件——参见附带光盘“Ch3\sl3-5.dbs”、“Ch3\sl3-5.jou”、“Ch3\sl3-5.trn”。

动画演示——参见附带光盘“Ch3\AVI\sl3-5.avi”。

3.2.5 GAMBIT 边界定义

在完成了几何建模与网格划分之后，GAMBIT 还要完成的一项任务就是边界定义，主要分为边界类型定义与介质类型定义。

单击按钮，弹出如图 3-59 所示的边界定义工具面板，共有两个功能按钮，从左到右分别为边界类型定义按钮与介质类型定义按钮。

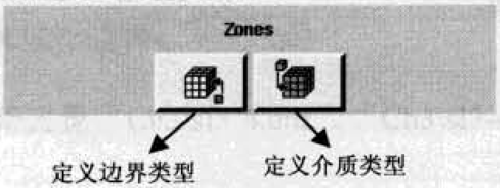


图3-59　边界定义工具面板

一、边界类型定义

在图 3-60 所示的 Specify Boundary Types 面板中，读者可以添加、删除或修改边界类型

的定义，并可在 Name 输入栏中输入区别性较好且便于记忆的名字，这里提供了 22 种流动进、出口边界类型，其类型列表如图 3-61 所示，被定义边界类型的对象通常为线、面或组。

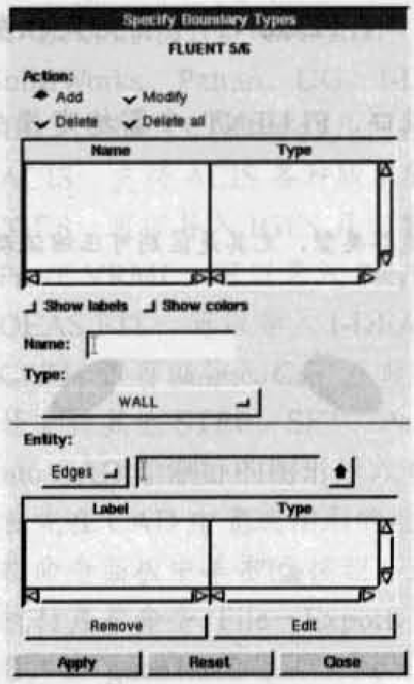


图3-60 边界类型定义面板

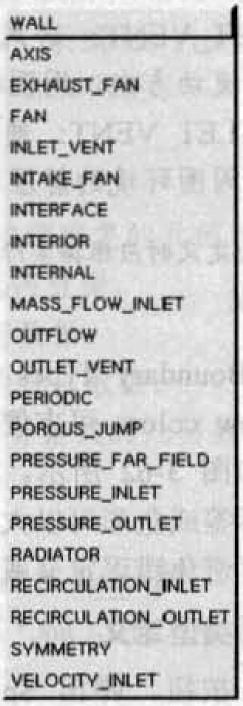


图3-61 边界类型列表

下面介绍几种常用的边界类型。

- WALL：壁面边界，或称为固体壁面，通常用于限制流体和固体区域，该类型定义后可在 FLUENT 中具体定义其为静止、运动、滑移或热边界。
- VELOCITY_INLET：速度入口边界，该类型定义后可在 FLUENT 中输入具体的流动入口速度和标量。
- MASS_FLOW_INLET：质量流动入口边界，定义后可在 FLUENT 中输入具体的质量流速，该类型适用于可压缩流体，对于不可压缩流体大可不必定义此种类型。
- PRESSURE_INLET：压力入口边界，该类型定义后可在 FLUENT 中具体输入入口边界的总压、静压等标量。
- OUTFLOW：出口流动边界，该边界用于模拟未知出口速度或压力的情况，假定了除压力之外的所有流动变量正法向的梯度为零，不能用于定义可压缩流动的边界。
- PRESSURE_OUTLET：压力出口边界，FLUENT 中可输入具体的出口静压值，当有回流时，使用压力出口边界代替 OUTFLOW 边界往往更容易收敛。
- PRESSURE_FAR_FIELD：压力远场边界，用于模拟无穷远处的自由可压流动，只适用于可压缩流动。
- SYMMETRY：对称边界，用于研究对象具有镜像特征的情况。
- AXIS：轴边界，必须使用在几何外形的中线处。
- INTAKE_FAN：进气扇边界，用于模拟外部进气扇，FLUENT 中需要给定压

降、流动方向、周围环境的总压及总温。

- EXHAUST_FAN：排气扇边界，用于模拟外部排气扇，FLUENT 中需给定压力跳跃及周围环境的静压。
- INLET_VENT：进风口边界，用于模拟进风口，FLUENT 中需给定损失系数、流动方向、周围环境的总压及总温。
- OUTLET_VENT：通风口边界，用于模拟通风口，FLUENT 中需给定损失系数、周围环境的静压和静温。

注意：边界类型定义时应根据实际的流体流动性质选择合适的边界类型，尤其是区别可压缩流动还是不可压缩流动。

Specify Boundary Types 面板中的 Show labels 和 Show colors 可方便读者查看已定义好的边界，如图 3-62 所示。对于复杂的几何模型，打开标签或色彩可以大大提高边界定义的效率，并可避免错误定义或重复定义。



图3-62 打开 Show labels 和 Show colors 时的模型视图

二、介质类型定义

单击 按钮，弹出 Specify Continuum Types 面板，如图 3-63 所示。对于固体与流体共存的计算模型，如流体与固体之间的传热问题，需要定义不同区域的介质类型。面板中的 Type 选项提供了固体和流体两种类型，如图 3-64 所示，被定义介质类型的对象通常为面、体或组等区域。其余填加、删除、修改、命名及标签、色彩显示功能等与边界类型定义相同，在此不再详述。

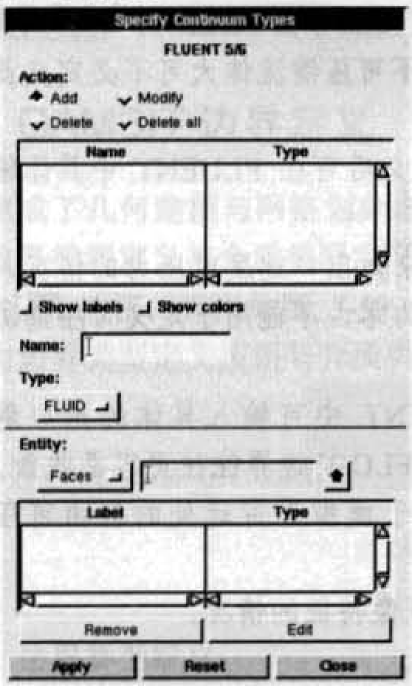


图3-63 介质类型定义面板

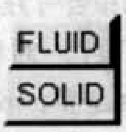


图3-64 介质类型列表

3.2.6 与 CAD 软件的衔接

简单的三维几何体可以在 GAMBIT 中直接创建，而复杂实体则需要借助于其他 CAD/CAE 系统的软件，GAMBIT 允许从主流的 CAD/CAE 系统如 Pro/ENGINEER、Ansys、SolidWorks、Patran、UG、I-DEAS、CATIA 等导入几何体和网格。

GAMBIT 支持的 CAD 软件几何接口如下。

- ACIS：支持 ACIS 各种版本的几何数据。
- IGES：可以导入 IGES 几何数据，并可在读入时自动清理重复的几何单元。
- Pro/E VRML：可以导入 Pro/E 软件的 VRML 格式的几何数据。
- DEAS FTL：可以导入 I-DEAS 软件的 FTL 格式的几何数据。
- CATIA：可以导入 CATIA 软件的 CATIA V4/V5 格式的几何数据。
- 还支持其他 STEP、SET、Parasolid、Optegra Visulizer 等格式的几何数据。

将 Auto CAD 绘制好的图形导入 GAMBIT 的步骤如下。

- 首先在 CAD 中完成图形的绘制。
- 在命令面板中单击按钮，选择图形的轮廓线，右击或按 Enter 键。
- 执行菜单命令 File→Export，选择保存类型为 ACIS（*.sat），输入合适的文件名，如 guan1.sat。
- 再次选择图形的轮廓线，右击或按 Enter 键。
- 打开 GAMBIT，执行菜单命令 File→Import→ACIS，输入文件名 guan1.sat，或从 Browse 中选取，如图 3-65 所示，即可将 CAD 中绘制的图形导入到 GAMBIT 中。

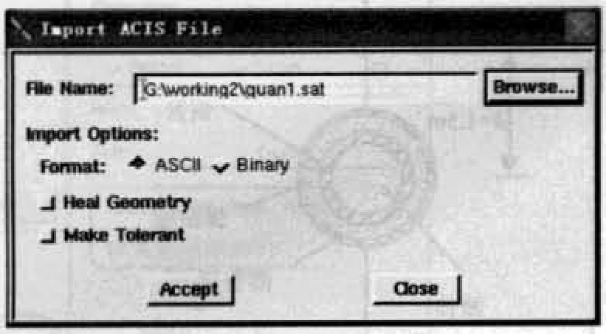


图3-65 导入 ACIS 文件

注意： GAMBIT 只能利用坐标参数进行图形定位，因此在 CAD 中绘制图形时要注意坐标的选取（如起始点为坐标原点）。

【实例 3-6】：二维埋地输液管传热模型与网格划分

本实例主要运用 GAMBIT 进行二维几何模型的建立及网格的划分，其介质类型涉及到流体与固体两种。

一、实例概述

如图 3-66 所示，对于埋地输液管，管内具有较高温度的液体流动，管外还包裹有保温层及沥青层，沥青层外为土壤环境，若要考虑管内液体的温度变化过程，则需要建立整个系

统的传热模型。

本例的输液管为 $\Phi426\times7$mm 钢管，管中心埋深为 1.5m，管外保温层厚度 40mm，沥青层厚度 6mm。由于涉及到与土壤环境的传热问题，需要考虑大地恒温层及管道热力影响区的水平边界来划定土壤区域范围，本例中选择土壤垂深 10m，水平方向的热力半径为 8m。

思路分析

由于问题具有对称性，实际建模时可以只建立一半，而将中心垂线设置成对称边界。另因模型相对复杂，几何建模时尽量遵循点→线→面的过程，以避免重合的线或面的存在。

通过本实例的演示过程，读者将学习到：

- 点的旋转创建；
- 圆弧的绘制；
- 线的分割；
- 线网格的单调递减划分；
- 非结构网格划分；
- 混合网格划分；
- 边界与介质类型的定义。

结果文件——参见附带光盘“Ch3\sl3-6.msh”、“Ch3\sl3-6.dbs”、“Ch3\sl3-6.jou”、“Ch3\sl3-6.trn”。

动画演示——参见附带光盘“Ch3\AVI\sl3-6.avi”。

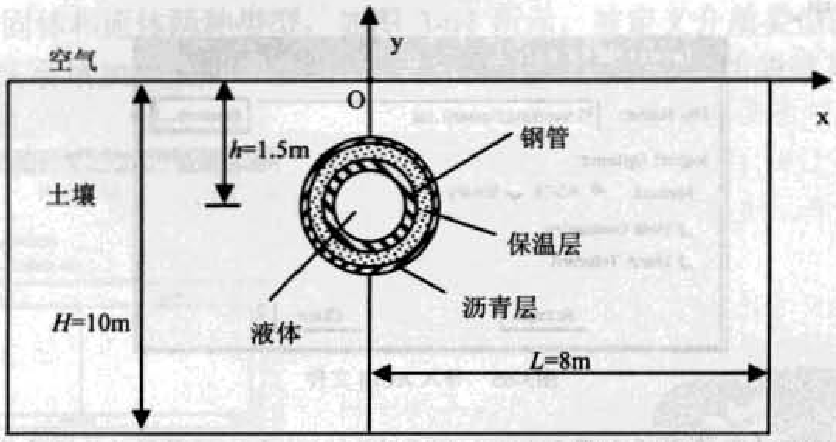


图3-66　二维埋地输液管传热问题描述

二、模型建立

遵循点→线→面的过程建立右半区域的几何模型。

1. 管道系统。

(1) 点的创建。

以坐标原点为圆心，根据钢管尺寸及保温层、沥青层厚度，计算出 x 方向圆弧上的点坐标分别为管内壁（0.213，0，0），管外壁（0.22，0，0），保温层外壁（0.26，0，0），沥青层外壁（0.266，0，0）。

单击 → → ，在 Create Real Vertex 面板的 x、y、z 坐标输入栏中输入（0，0，

0)，单击 Apply 按钮生成坐标原点，随后按同样方法依次建立点（0.213，0，0）、点（0.22，0，0）、点（0.26，0，0）和点（0.266，0，0），如图 3-67 所示。单击按钮，在 Move/Copy Vertices 面板的黄色输入栏中选取 vertex.2~ vertex.5 四个点，视图中呈红色显示，如图 3-68 所示。然后，选中 Copy 与 Rotate 选项，在 Angle 栏输入 90，单击 Apply 按钮。重复点复制步骤，改变 Angle 为-90，再复制出 4 个点。至此，已经在视图中绘制出了所有圆弧壁面上的辅助点，如图 3-69 所示。

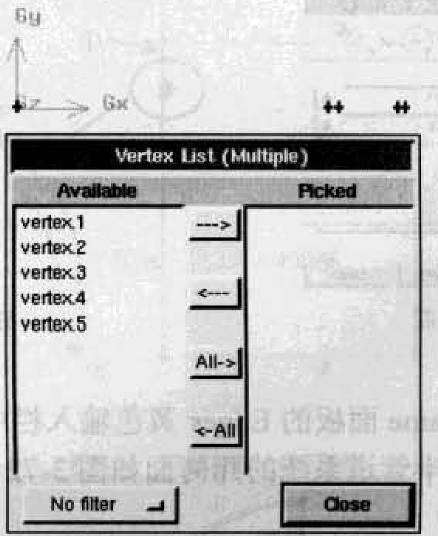


图3-67　建立 x 方向 5 个主要辅助点

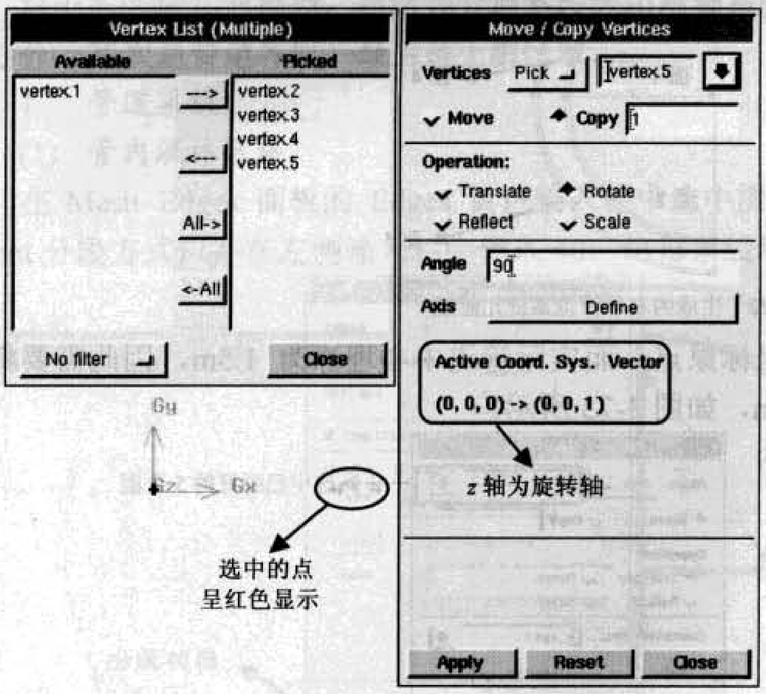


图3-68　点的旋转创建

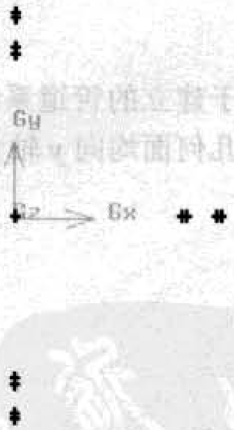


图3-69　生成的管道系统辅助点

注意：GAMBIT 中的旋转以逆时针方向为正，顺时针方向为负，读者应根据需要输入正确的旋转角度值。

(2) 线的创建。

单击 → ，在 Create Circular Arc 面板中以第一种方式绘制圆弧，选择原点为圆心，点 2 和点 6 为圆弧上两点，单击 Apply 按钮，建立如图 3-70 所示的圆弧。

依次建立所有的圆弧曲线，并连接 y 方向管径所在直线，如图 3-71 所示。

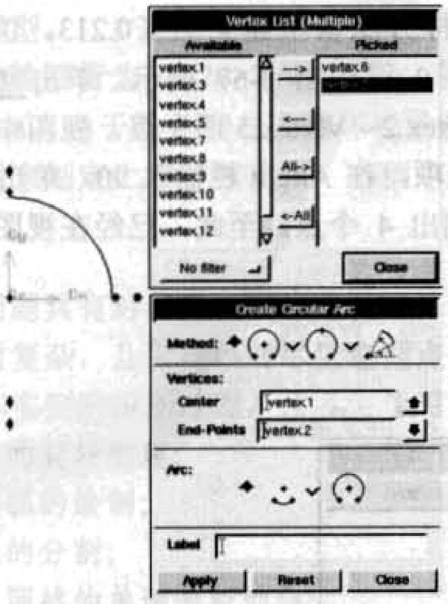


图3-70　圆弧的绘制

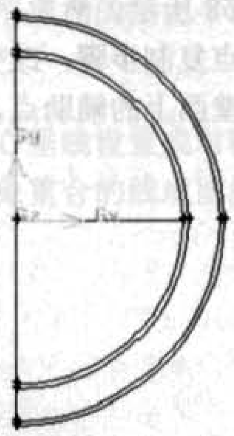


图3-71　生成的右半管道系统几何线

(3) **面的创建。**

在 Create Face from Wireframe 面板的 Edges 黄色输入栏中选取需要围成面的线段，单击 Apply 按钮生成几何面，右半管道系统的几何面如图 3-72 所示，共 5 个面。

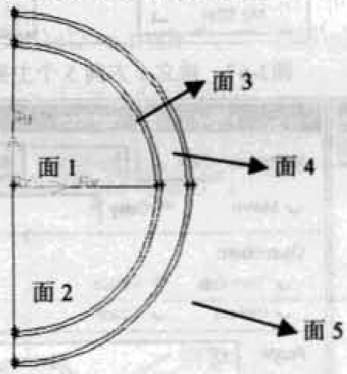


图3-72　生成的右半管道系统几何面

由于建立的管道系统圆心位于坐标原点，而实际管道中心埋深为 1.5m，因此需要将绘制好的几何面均向 y 轴负向移动 1.5m，如图 3-73 所示。

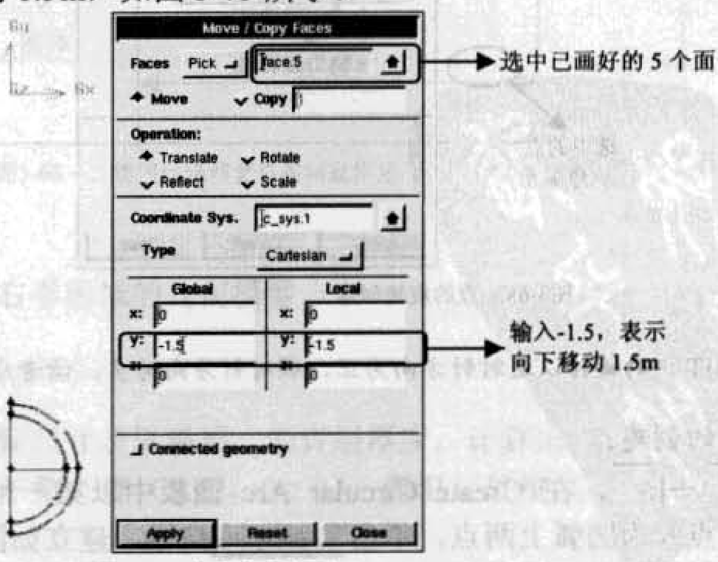


图3-73　移动生成的面

注意：GAMBIT 中几何尺寸长度单位为 m，因此在实际创建过程中，需要将单位均换算成米。

2. 土壤区域。

土壤区域的 4 个顶点为（0，0，0）、（8，0，0）、（0，-10，0）和（8，-10，0），点绘制后连接成线，由图 3-74 所示的 7 条线围成第 6 个面。

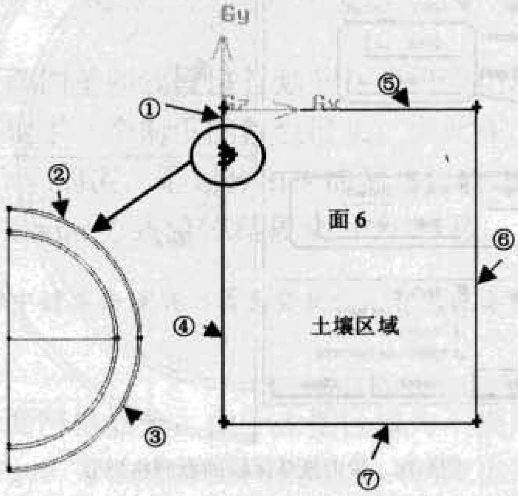


图3-74 绘制好的土壤区域

三、网格划分

对于多区域几何模型，网格划分通常按照由难到易的顺序，本例先对管道内液体区域进行划分，其次是管道各层，最后是土壤区域。

1. 管道系统。

(1) 管内液体区域。

在 Mesh Edges 面板的 Edges 黄色输入栏中选中图 3-75 所示的 5 根线，选择 Interval Count 分段方式，并在左侧输入栏中输入 40，将每条线均分为 40 段。

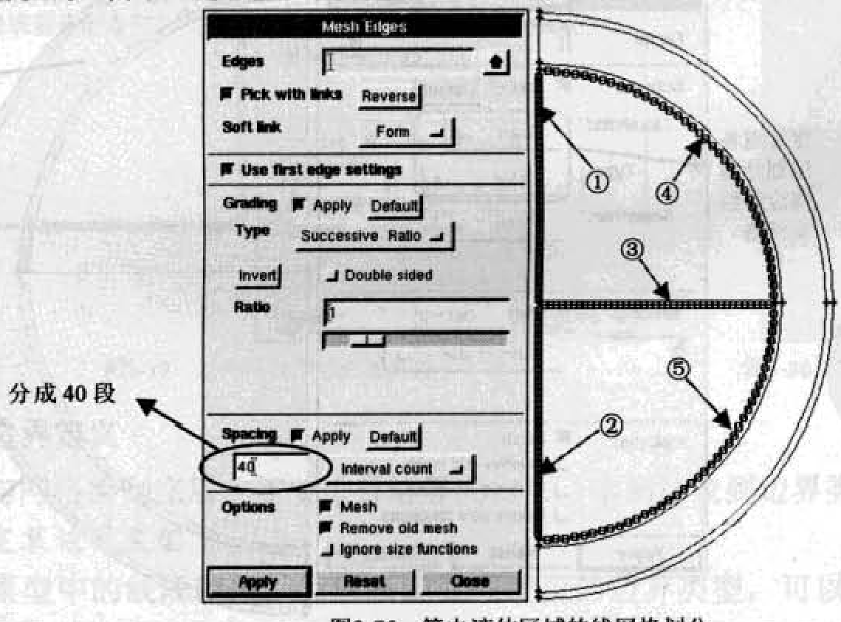


图3-75 管内液体区域的线网格划分

单击 → ，打开 Mesh Faces 面板，选中已经完成线网格划分的面 1、面 2，运用 Quad 单元与 Tri Primitive 方法对这两个面进行划分，其网格生成情况如图 3-76 所示。由于

遵循的是由线到面的网格生成顺序，所以 Mesh Faces 面板中 Interval Size 左侧输入栏的默认值为 1，不需更改，直接单击 Apply 按钮即可。

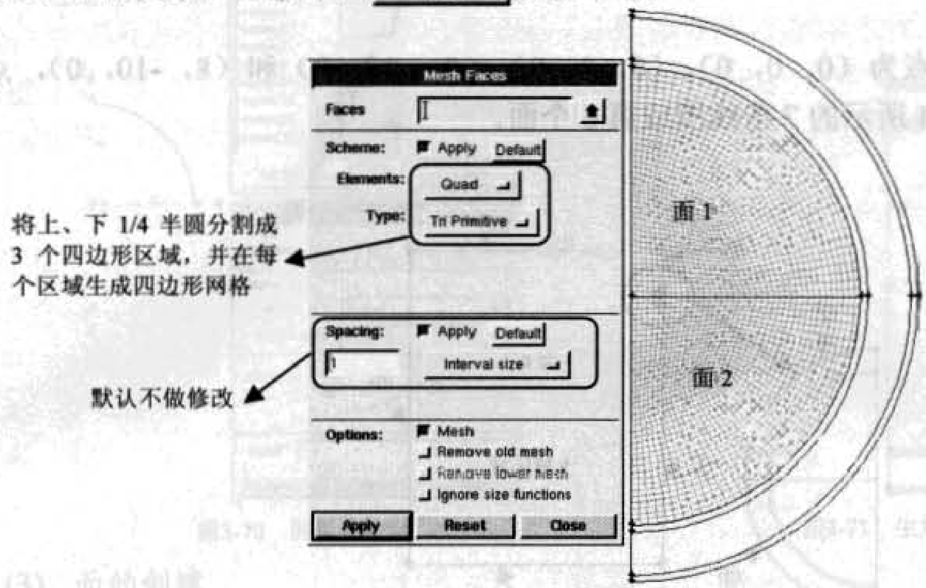


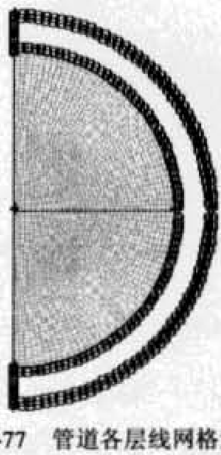
图3-76　管内液体区域的面网格划分

注意：面 1、面 2 还可以运用 Pave 法生成网格，但是生成的网格疏密不一，不如文中的生成方法好。

(2) 管道各层。

沿径向将钢管层分为 4 段，保温层 11 段，沥青层 3 段，半圆弧均分为 80 段，划分好的线网格如图 3-77 所示。

对钢管、保温层、沥青层均采用 Quad 单元与 Map 方法进行面网格划分，绘制出如图 3-78 所示的网格。


图3-77　管道各层线网格划分

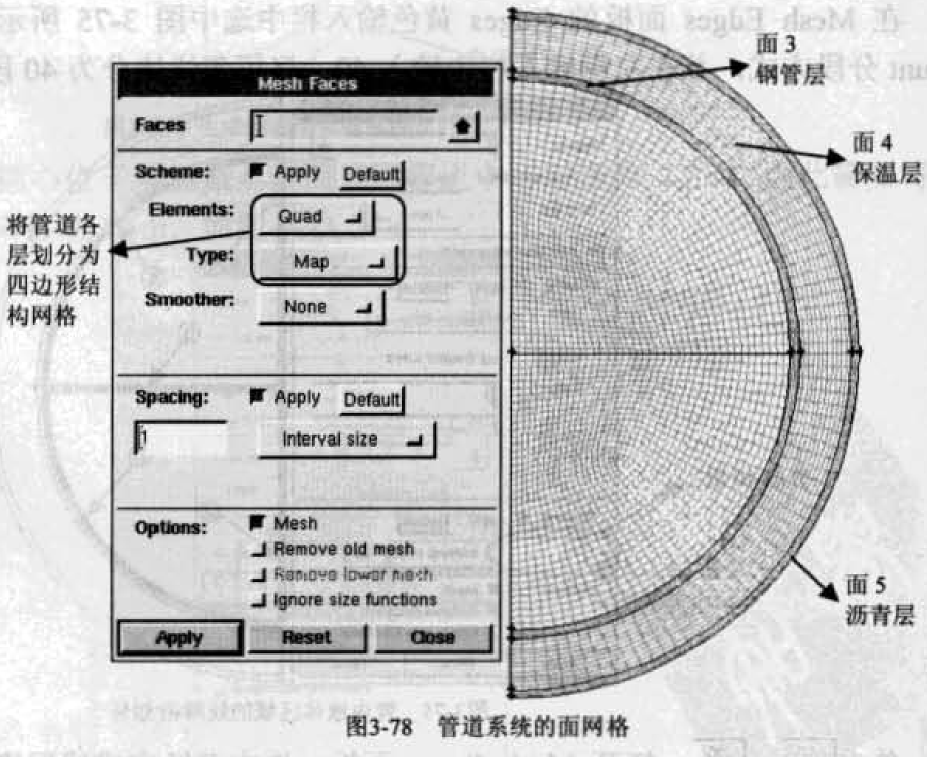


图3-78　管道系统的面网格

2. 土壤区域。

首先，将代表土壤区域的地表面与大地恒温层的两个水平线段用 Interval Count 方法分

为 60 段，将代表热力影响区边界的土壤区域右侧垂直线段划分为 80 段。

其次，对 y 轴上管道上部的垂向线段进行划分，由于越接近管道系统的传热效应越明显，因此将该线段进行单调递减划分。在 Mesh Edges 面板中选中该线段，此时，该线上会出现一个红色的箭头，此箭头代表了比例因子作用的方向。在 Ratio 输入栏中输入 0.95，选择 Interval Count 方法，并输入 40，将线段以比例因子为 0.95 单调递减地分为 40 段，如图 3-79 所示。

再次，对 y 轴上管道下部的垂向线段进行划分，该线段仍然采用越接近管道系统网格越密的划法。选中该线时，出现了一个向下的红色箭头，因此在 Ratio 输入栏中应输入一个大于 1 的值（若输入的是小于 1 的值，则划分出来的网格离管道越近反而越疏），本例中输入的值为 1.035。运用 Interval Count 方式将该线段划分为 75 段。

注意：当出现红色箭头时，鼠标中键单击该线，箭头会反向，即出现垂直向上的箭头，此时对应的比例因子应设置小于 1。

最后，对土壤区域进行面网格划分，由于土壤区域为不规则图形，且各线段的网格数不一，因此采用 Tri 单元与 Pave 方法进行面网格划分。划分出来的二维埋地输液管传热问题的网格如图 3-80 所示。

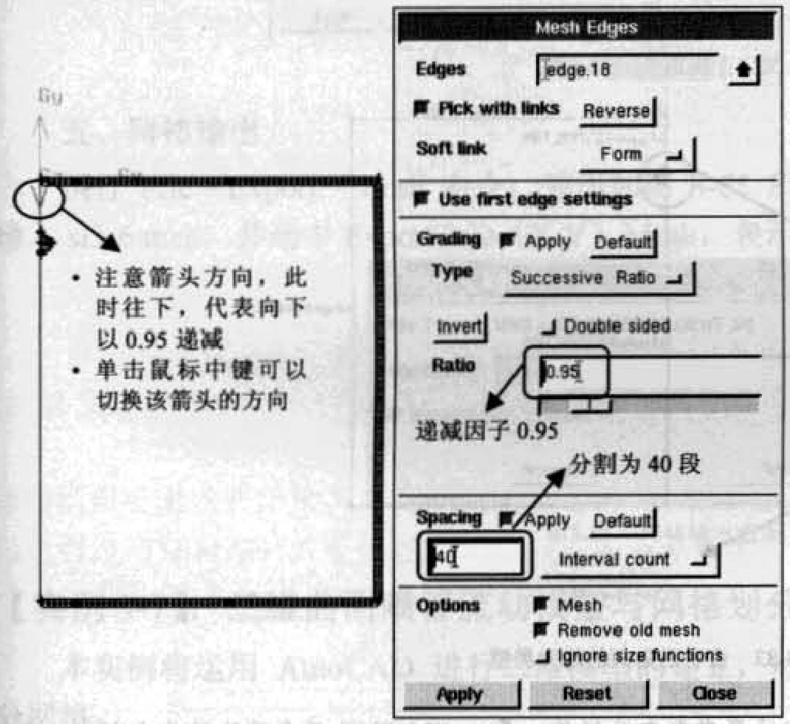


图3-79 划分单调递减的线网格

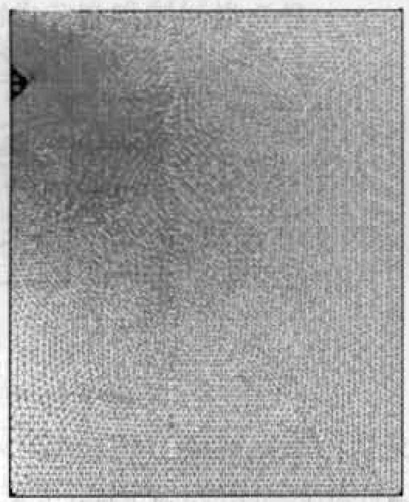


图3-80 二维埋地输液管传热问题的网格

四、边界定义

模型与网格绘制完后，需要进行边界的定义，本例涉及到边界类型与介质类型两类。

1. 定义边界类型。

由于模型中的线段较多，为清晰定义各线段的边界类型，可以先关闭网格显示。单击按钮，在弹出的如图 3-81 所示的 Specify Display Attributes 面板中将 Mesh 显示选择为 Off，单击 Apply 按钮即可实现网格显示的关闭。

本例有 WALL 与 SYMMETRY 两种边界类型。y 轴上所有的线段均设置为 SYMMETRY

边界，其余线段除上、下 1/4 圆中间的那条水平线外都设置为 WALL 边界。为了在 FLUENT 中能够分辨各边界的名称，在 GAMBIT 边界类型定义时，需要读者输入便于记忆和识别的名称，如图 3-82 所示。



图3-81　关闭网格显示操作

Name	Type
biao-mian	WALL
di-mian	WALL
you-bian	WALL
duichenzhou	SYMMETRY
gangguan-neibi	WALL

图3-82　定义好的边界类型名称列表

单击 Show Labels 可以查看定义好的边界类型，方便读者检查定义是否正确，以及查找未定义的线段，如图 3-83 所示。

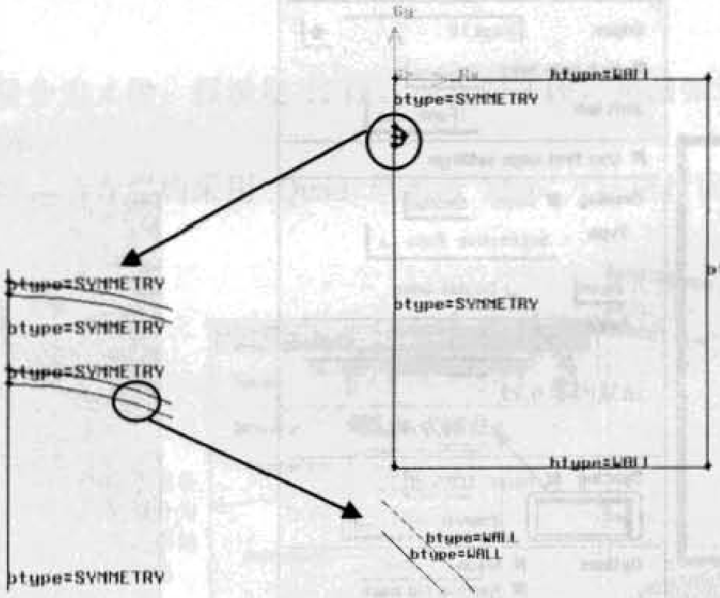


图3-83　查看已定义的边界类型

注意：对上、下 1/4 圆中间的水平线不进行边界类型定义操作，导入 FLUENT 后会默认其为内部线，即相当于不存在。

2. 定义介质类型。

管内高温液体与管道各层及土壤环境之间是一个非稳态的传热过程，所以需要将管内液体定义为流体，其余区域（包含钢管、保温层、沥青层及土壤）都定义为固体。

在 Specify Continuum Types 面板中，通过 Add 逐个添加各个区域的介质类型，并赋以合适的名称，选中 Show colors 后如图 3-84 所示。管内液体呈现为绿色，其余固体区域呈现为灰色。

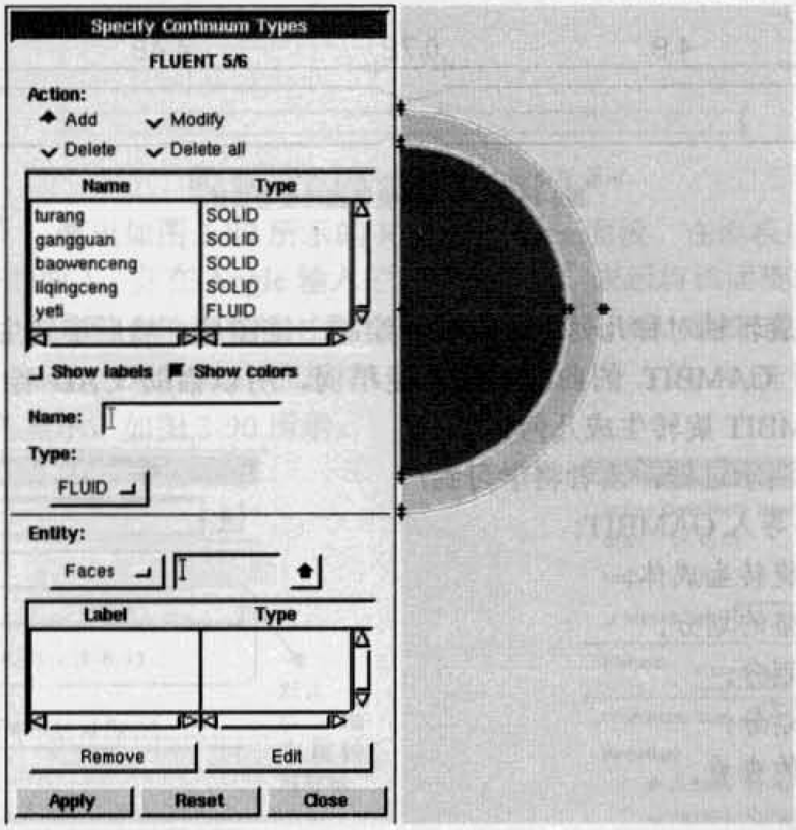


图3-84　介质类型定义

五、网格输出

执行 File→Export→Mesh 命令，弹出如图 3-85 所示的网格文件输出面板，在文件名中输入 sl3-6.msh，并选中 Export 2-D（X-Y）Mesh，表示输出的为二维模型网格文件。

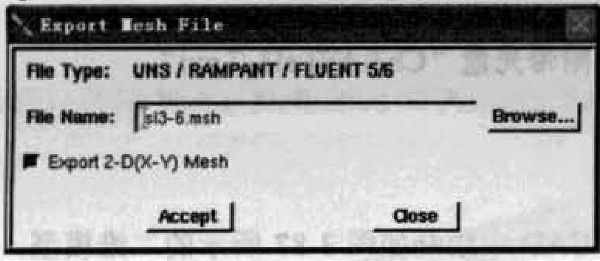


图3-85　网格输出面板

【实例 3-7】：三维曲面喷管流动模型与网格划分

本实例将运用 AutoCAD 进行二维模型的建立，然后导入 GAMBIT 建立三维模型及划分网格。

一、实例概述

流体通过图 3-86 所示的三维曲面喷管，流速、压力等特性参数将发生一定程度的变化，其变化大小正是喷管设计及安全输送的有力依据。如高速气体作可压缩流动，通过喷管后是否达到超音速？再如原油在流动过程中蜡、沥青质等沉积于管壁可能会形成图示流道，其对后续流动与沉积的影响如何？这些都是我们所关注的问题。

本例管长 10m，在 4.8m 管长处存有一长为 0.72m 的喷管，流体从左端流入，通过喷管后由右端流出。

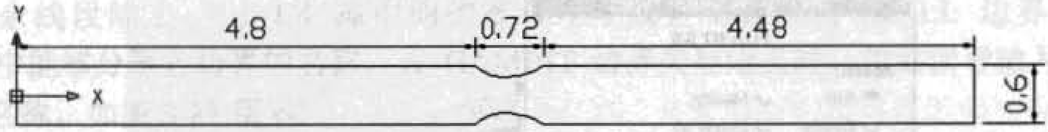


图3-86 三维曲面喷管流动模型描述

思路分析

本例管道为一旋转轴对称几何体，可以先绘制二维图形，然后旋转生成三维实体。由于本例涉及曲面，而 GAMBIT 的曲面绘制功能稍弱，所以借助 CAD 绘制出基本的二维图形，然后导入 GAMBIT 旋转生成几何体。

通过本实例的演示过程，读者将学习到：

- CAD 图形导入 GAMBIT;
- 二维平面旋转生成体;
- 边界层网格的划分;
- 面网格的划分;
- 体网格的划分;
- 网格质量的查看。

起始文件——参见附带光盘“Ch3\sl3-7.sat”。

结果文件——参见附带光盘“Ch3\sl3-7.msh”、“Ch3\sl3-7.dbs”、“Ch3\sl3-7.jou”、“Ch3\sl3-7.trn”。

动画演示——参见附带光盘“Ch3\AVI\sl3-7.avi”。

二、模型建立

1. CAD 绘图。

由分析可知，只需在 CAD 中绘制如图 3-87 所示的二维模型，其中喷管曲线部分用样条曲线绘制。需特别指出的是，图形应以坐标原点为起始点，以方便导入 GAMBIT 后较好地将图形定位。

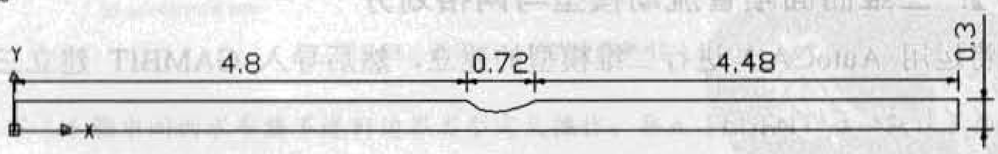


图3-87 CAD 绘制的旋转轴对称二维图形

绘制好基本的二维图形之后，通过命令面板中的按钮，将图形生成面域，最后输出文件名为 sl3-7.sat 的 ACIS 类型文件。

2. GAMBIT 建模。

打开 GAMBIT，执行 File→Import→ACIS 命令，在弹出的 Import ACIS File 对话框中输入文件名 sl3-7.sat，将 CAD 绘制好的图形导入到 GAMBIT，如图 3-88 所示。

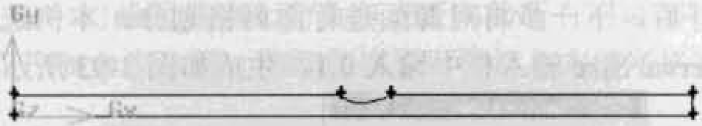


图3-88　导入GAMBIT后的二维图形显示

单击 → ，弹出如图 3-89 所示的 Revolve Faces 面板。在面板中的 Faces 右侧黄色输入框中选中画好的面 1，并在 Angle 输入栏中输入 360，表示将该面旋转一周。

由于 Axis 默认的是以 z 轴为旋转对称轴，而本例应为 x 轴，因此需要单击 Axis 右侧的 Define，在弹出的 Vector Definition 面板中，将 Direction 下方的 X 选中，即使 X 右侧的 Positive 按钮呈红色显示，如图 3-90 所示。

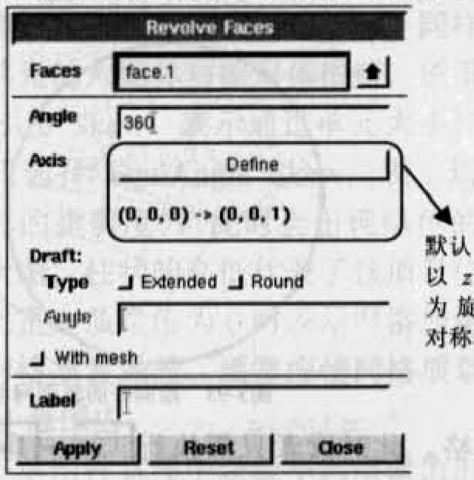


图3-89　Revolve Faces 面板

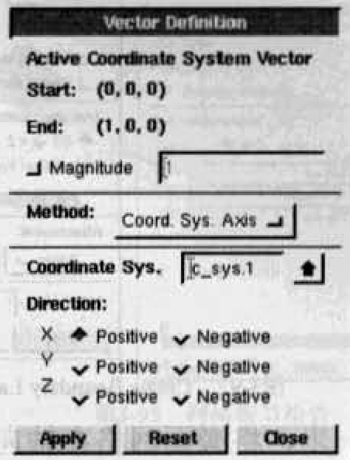


图3-90　Vector Definition 面板

注意：Revolve Faces 面板中的 With mesh 选项，表示可以在源面上绘制好网格，连同网格一起旋转生成体。

单击两次 Apply 按钮，关闭 Vector Definition 和 Revolve Faces 面板，生成的三维实体如图 3-91 所示。

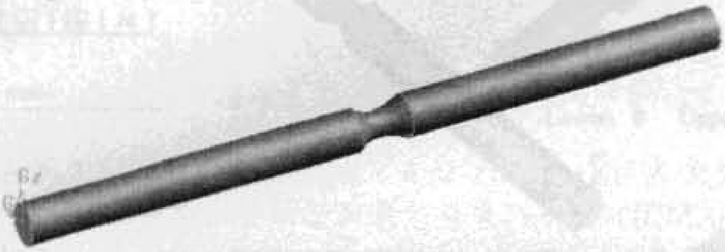


图3-91　绘制好的三维曲面喷管流动模型

三、网格划分

三维实体的网格划分可以以一个面为源面，轴向拉伸生成整个体网格。因此选择 X=0 这个面作为源面进行面网格的划分。

由于考虑到流体的近壁面粘性效应，首先需要绘制边界层网格。单击 → → ，弹出 Create Boundary Layer 面板，在 Edges 黄色输入栏中选取线 7，视图中该线会出现一个红色的箭头，代表着边界层生成的方向。然后选中 1:1 的边界层生成方式，并设置第一个点距壁面距离为 0.001m，递增比例因子为 1.2，边界层为 4 层。最后，单击 Apply 按钮即绘制完边界层网格，如图 3-92 所示。

边界层网格划分好后，下一步将对源面进行面网格划分，本例选取 Quad 网格单元和 Pave 划分方式，在 Interval Size 输入栏中输入 0.1，生成如图 3-93 所示的面网格。

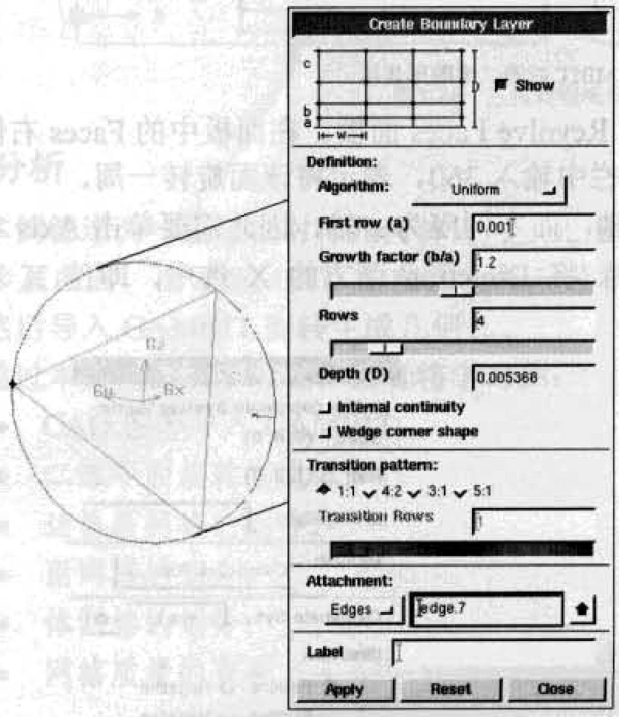


图3-92　Create Boundary Layer 面板

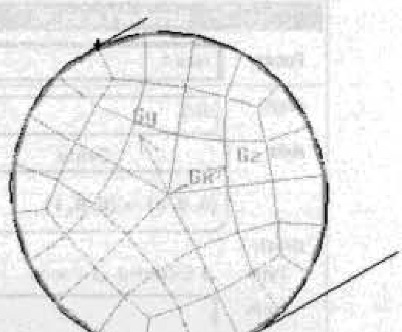


图3-93　绘制好的源面网格

最后一步，将源面网格在轴向拉伸，生成体网格。此时读者只需执行 → 体网格划分命令，在 Mesh Volumes 面板中，选中该实体，以 Hex/Wedge 网格单元和 Copper 划分方式进行体网格划分，并在 Interval Size 输入栏中输入 0.1，划分好的网格如图 3-94 所示。



图3-94　绘制好的三维曲面喷管体网格

四、网格质量的检查

单击视图控制面板中的 按钮，弹出 Examine Mesh 网格检查面板，读者可以根据此面板进行网格质量的检查。

面板最上部 Display Type 选择栏中有笛卡尔坐标系、球坐标系与质量值范围三个选项，通常用到的为第一个和第三个。当选中第一个按钮时，如图 3-95 所示，针对三维问题，读者需选择三维网格单元，其中包括六面体、四面体、锥体与楔形体四种（若为二维问题，需要鼠标单击 3D Element 后选中 2D Element，包含四边形与三角形两种网格单元），通过拖曳 Cut Orientation 下方的 x、y、z 三条滚动轴，可以检查实体内不同截面的网格。若选中“-”

或“+”按钮，表示在选中的截面基础上向负向或正向的所有网格都被显示在视图窗口中。该面板中还有其他视图控制命令按钮，均起到增强可视性与方便网格检查的作用，在此不做详述。

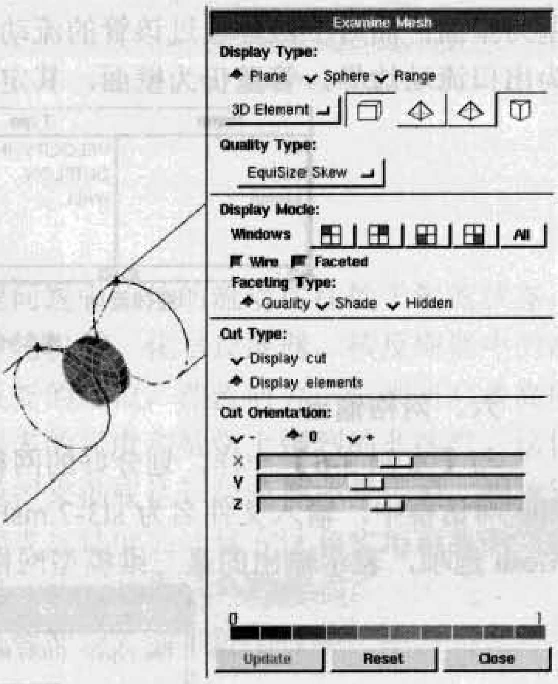


图3-95　网格细节检查

注意： 读者需根据实际模型及网格划分情况选择显示的网格单元，本例中只涉及六面体与楔形体两种形式，故只选择三维网格单元的第一和第四个按钮。

当选中 Examine Mesh 面板中 Range 质量值范围按钮时，面板如图 3-96 所示。同样选中三维网格单元的六面体与楔形体按钮，质量类型选为 EquiSize Skew，表示通过单元大小计算的歪斜度（或选择 EquiAngle Skew，表示通过单元夹角计算的歪斜度），此时会出现绿色的质量值范围柱状图，柱状的高低代表了该质量值网格所占的总比重。质量值为 0 时表示网格质量最好，而 1 为网格质量最差，通常应使网格质量值控制在 0～0.4 范围内。

通过单击柱状图中表征不同质量值的柱条，可以在视图窗口中查看该质量值范围内的网格及网格的具体位置，如图 3-97 所示。

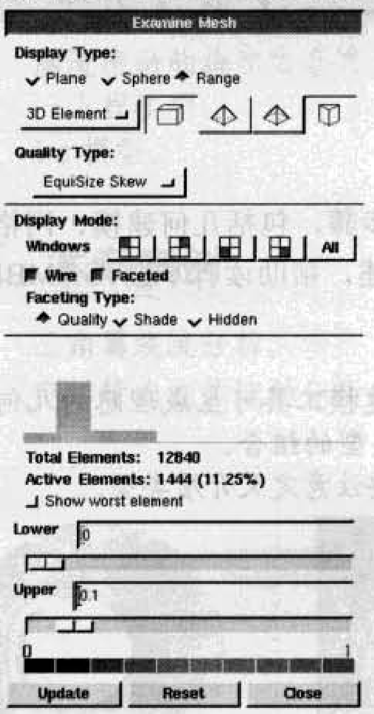


图3-96　网格质量范围



图3-97　不同质量值范围的网格显示

注意： 若 EquiSize Skew > 0.97 的网格数占总网格数的比重较多时，需要对网格进行重新划分，否则计算很容易发散。

五、边界定义

本例只考察流体在管内的流动，因此不涉及介质类型的定义，只需定义边界类型。对于气体通过喷管的流动，可以将面 X=0 定义为压力入口，面 X=10 定义为压力出口，其余管壁为壁面；而对于液体通过该管的流动，则可以将面 X=0 定义为速度入口，面 X=10 定义为出口流动边界，管壁仍为壁面，其定义好的类型列表如图 3-98 所示。

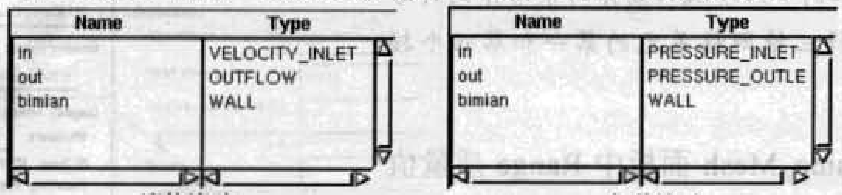


图3-98　定义好的边界类型列表

六、网格输出

与【实例 3-6】一样，划分好的网格需要导出为.msh 文件，在图 3-99 所示 Export Mesh File 对话框中，输入文件名为 sl3-7.msh。与上例不同的是，此时不用选 Export 2-D（X-Y）Mesh 选项，表示输出的是三维模型网格文件。

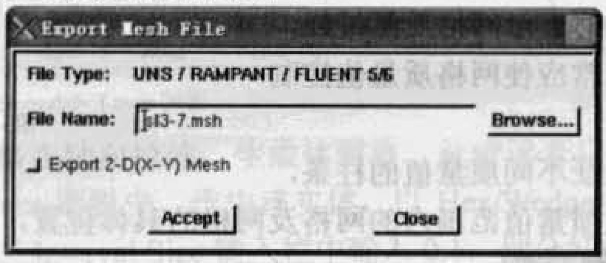


图3-99　网格输出对话框

3.3 本章小结

本章主要讲述了前处理软件 GAMBIT 的使用方法和步骤，包括几何建模、网格划分、边界定义等。通过两个分表代表二维与三维模型的实例讲述，帮助读者掌握 GAMBIT 的建模与网格生成方法，为后续导入 FLUENT 计算打下基础。

备忘录

- 灵活运用 GAMBIT 的点、线、面、体建模工具可生成理想的几何模型。
- GAMBIT 网格划分要注意网格单元与类型的组合。
- 对于涉及固体与流体区域共存的问题，要注意定义介质类型。

第 4 章
湍流模型

湍流是自然界广泛存在的流动现象，在多数工程问题中流体的流动往往处于湍流状态，如大气、海洋环境的流动，飞行器与船舰的绕流，叶轮机械、化学反应器、核反应器中的流体运动都是湍流。正是由于湍流特性在工程中占有重要的地位，湍流研究一直被研究者高度重视。湍流流动的核心特征是其在物理上近乎于无穷多的尺度和数学上强烈的非线性，这使得人们无论是通过理论分析、实验研究还是计算机模拟来彻底认识湍流都非常困难。相比之下，计算机模拟要更具可操作性，但需要我们继续探求高精度的计算方法和实用可靠的网格生成技术，在研究湍流机理的同时，建立相应的模式，从而进行适当的模拟。

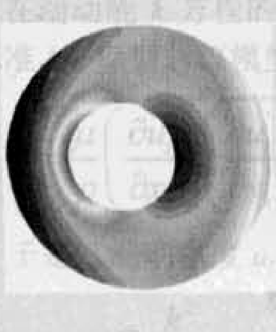
本章不深入涉及湍流的机理，主要介绍发展至今常用及重要的湍流模型，并通过两个实例介绍如何在 FLUENT 中进行湍流流动的模拟。

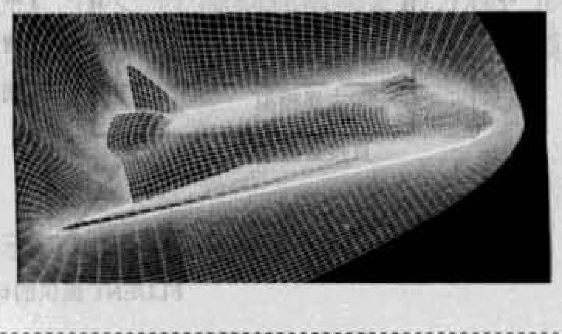
本章要点

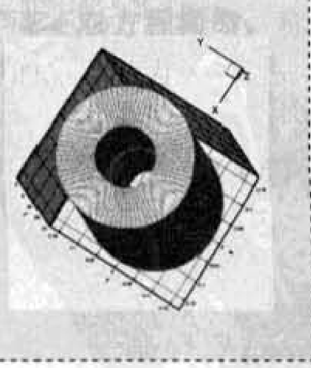
- 湍流流动的特征及分类。
- 一方程模型。
- k-ε 模型。
- RSM 模型。
- LES 模型。
- 湍流流动实例。

本章案例

- 三角翼绕流分析。
- 突扩管内流体流动分析。







4.1 常见的湍流模型

雷诺试验表明，当雷诺数（Re）小于某一临界值时，流动是平滑的，流体质点互不混掺，有条不紊地作有序的成层流动，这种流动状态称为层流。当雷诺数大于临界值时，流动呈无序的混乱状态，这种局部速度、压力等物理量在时间和空间中发生不规则脉动的流体流动，称为湍流。湍流中的脉动现象对工程设计有直接影响，压力的脉动增大了建筑物上承受风载的瞬时载荷，有可能引起建筑物的有害振动；对于水轮机而言，脉动压力最大的负波峰则增加了发生空化的可能性。

一般认为，无论湍流运动多么复杂，非稳态的连续性方程和 N-S 方程对于湍流的瞬时运动都仍然适用。在连续性方程和 N-S 方程基础之上，人们不断引入新的算法，逐步发展成了多个湍流模型，主要有如下 3 类。

- 湍流输运系数模型，即将速度脉动的二阶关联量表示成平均速度梯度与湍流粘性系数的乘积，模型的任务就是给出计算湍流粘性系数的方法。根据建立模型所需要的微分方程的个数，分为零方程模型、单方程模型和双方程模型。
- 直接建立湍流应力和其他二阶关联量的输运方程。
- 把湍流分成大尺度湍流和小尺度湍流，通过求解三维经过修正的 N-S 方程，得到大涡旋的运动特征，而小涡旋运动则采用上述以湍流的统计结构为基础对所有涡进行统计平均的模型。这种模型称为大涡模拟。

FLUENT 提供的湍流模型如图 4-1 所示，实际求解中，应根据具体问题的湍流特点来决定。选择的原则是精度高、省时、简单通用。

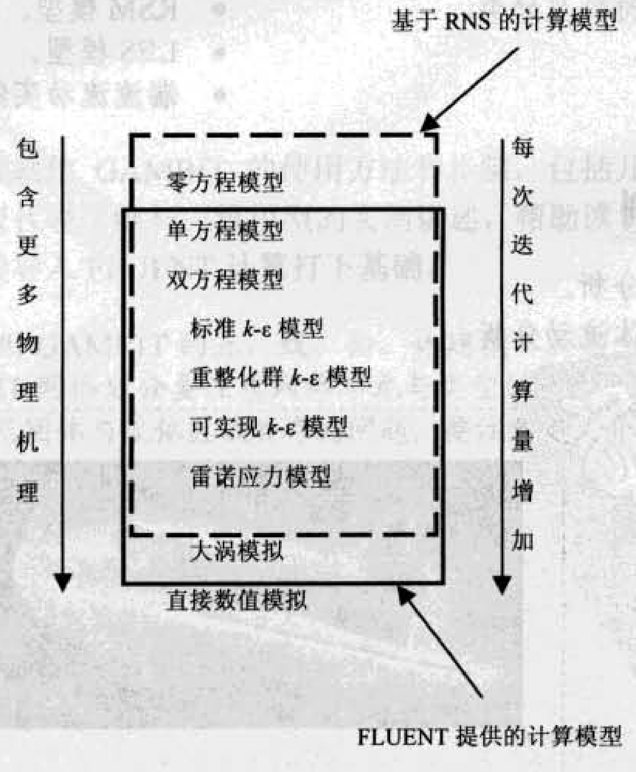


图4-1 湍流模型框图

后面各节详细介绍几类常用的湍流模型及其控制方程。

4.2 一方程模型

在介绍一方程（单方程）模型前，首先给出湍流时均的连续性方程与雷诺方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i)=0 \tag{4-1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j)=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu\frac{\partial u_i}{\partial x_j}-\rho\overline{u_i' u_j'}\right)+S_i \tag{4-2}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j\phi)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma\frac{\partial\phi}{\partial x_j}-\rho\overline{u_j'\phi}\right)+S \tag{4-3}$$

单方程模型在湍流时均的连续性方程与雷诺方程的基础之上，再建立了一个湍动能 k 的输运方程，将湍动粘度 μ_t 表示成 k 的函数，从而使方程组封闭。湍动能 k 的输运方程为：

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+\mu_t\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\frac{\partial u_i}{\partial x_j}-\rho C_D\frac{k^{3/2}}{l} \tag{4-4}$$

从左至右，方程（4-4）中各项依次为瞬态项、对流项、扩散项、产生项、耗散项。由普朗特表达式有：

$$\mu_t=\rho C_\mu\sqrt{k}l \tag{4-5}$$

式中，σ_k、C_D、C_μ 为经验常数，$\sigma_k=1$，$C_\mu=0.09$，$C_D=0.08\sim0.38$。

一方程模型中如何确定长度比尺 l 仍为不易解决的问题，因此很难得到推广应用。

4.3 k-ε 模型

k-ε 模型为双方程模型，是在一方程模型的基础之上，再引入了一个关于湍动耗散率 ε 的方程。该模型是目前使用最为广泛的湍流模型，又分为标准 k-ε 模型、重组化群 k-ε 模型和可实现 k-ε 模型。

一、标准 k-ε 模型

在湍动能 k 方程的基础上，引入一个湍动耗散率 ε 的方程，形成了 k-ε 双方程模型，称为标准 k-ε 模型。该模型于 1972 年由 Launder 和 Spalding 提出。模型中的 ε 定义为：

$$\varepsilon=\frac{\mu}{\rho}\overline{\left(\frac{\partial u_i'}{\partial x_k}\right)\left(\frac{\partial u_i'}{\partial x_k}\right)} \tag{4-6}$$

于是，湍动粘度 μ_t 可表示成 k 与 ε 的函数：

$$\mu_t=\rho C_\mu\frac{k^2}{\varepsilon} \tag{4-7}$$

因此，标准 k-ε 模型的输运方程为：

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+G_k+G_b-\rho\varepsilon-Y_M+S_k \tag{4-8}$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho\varepsilon u_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}\right]+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k+C_{3\varepsilon}G_b)-C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k}+S_\varepsilon \tag{4-9}$$

其中：

$$\begin{cases} G_k=\mu_t\left(\dfrac{\partial u_i}{\partial x_j}+\dfrac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\dfrac{\partial u_i}{\partial x_j} \\ G_b=\beta g_i\dfrac{\mu_t}{\mathrm{Pr}_t}\dfrac{\partial T}{\partial x_i} \\ \qquad \beta=-\dfrac{1}{\rho}\dfrac{\partial\rho}{\partial T} \\ Y_M=2\rho\varepsilon M_t^2 \\ \qquad M_t=\sqrt{k/a^2} \\ \qquad a=\sqrt{\gamma RT} \end{cases} \tag{4-10}$$

式中，G_k 是由于平均速度梯度引起的湍动能产生；G_b 是由于浮力影响引起的湍动能产生；Y_M 为可压缩湍流脉动膨胀对总的耗散率的影响；$C_{1\varepsilon}$、$C_{2\varepsilon}$、$C_{3\varepsilon}$ 为经验常数，FLUENT 中默认值为 $C_{1\varepsilon}$=1.44、$C_{2\varepsilon}$=1.92、$C_{3\varepsilon}$=0.09；σ_k、σ_ε 分别为湍动能和湍动耗散率对应的普朗特数，FLUENT 中默认值为 σ_k=1.0、σ_ε=1.3；Pr_t 为湍动普朗特数，默认取 Pr_t=0.85；g_i 为重力加速度在 i 方向上的分量；β 为热膨胀系数；M_t 为湍动马赫数；a 为声速。

标准 k-ε 模型中湍动能的输运方程是通过精确方程推导得到的，但耗散率的方程是通过物理推理及数学上模拟相似原形方程得到的。该模型假设流动为完全湍流，分子粘性的影响可以忽略，因此，标准 k-ε 模型只适合完全湍流的流动过程模拟。

二、重组化群 k-ε 模型

重组化群 k-ε 模型（RNG k-ε 模型）是由 Yakhot 和 Orzag 提出的，它是对瞬时 N-S 方程用重组化群的数学方法推导出来的模型。模型中的常数与标准 k-ε 模型不同，而且方程中也出现了新的函数或项。所得到的湍动能和耗散率方程与标准 k-ε 模型相似，为：

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\alpha_k\mu_{eff})\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+G_k+G_b-\rho\varepsilon-Y_M \tag{4-11}$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho\varepsilon u_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\alpha_\varepsilon\mu_{eff})\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}\right]+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k+C_{3\varepsilon}G_b)-C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k}-R \tag{4-12}$$

其中：

$$\begin{cases} \mu_{eff} = \mu + \mu_t \\ \mu_t = \rho C_\mu \dfrac{k^2}{\varepsilon} \end{cases} \tag{4-13}$$

式中，G_k 是由于平均速度梯度引起的湍动能产生；G_b 是由于浮力影响引起的湍动能产生；Y_M 为可压缩湍流脉动膨胀对总的耗散率的影响，这些参数与标准 k-ε 模型中的参数相同；α_k、α_ε 分别为湍动能和耗散率的有效普朗特数的倒数；对于高雷诺数问题，C_μ=0.0845。

重整化群 k-ε 模型主要针对的是高雷诺数流动问题，对于低雷诺数问题则需要进行相应的设置。

三、可实现 k-ε 模型

标准 k-ε 模型对时均应变率特别大的情形，有可能导致负的正应力。为使流动符合湍流的物理定律，需要对正应力进行某种数学约束。可实现 k-ε 模型（Realizable k-ε 模型）正是基于此提出，其湍动能及耗散率输运方程为：

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + G_k + G_b - \rho\varepsilon - Y_M \tag{4-14}$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + \rho C_1 E\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\upsilon\varepsilon}} + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}C_{3\varepsilon}G_b \tag{4-15}$$

其中：

$$\begin{cases} C_1 = \max\left(0.43, \dfrac{\eta}{\eta + 5}\right) \\ \eta = \left(2E_{ij}\cdot E_{ij}\right)^{1/2}\dfrac{k}{\varepsilon} \\ E_{ij} = \dfrac{1}{2}\left(\dfrac{\partial u_i}{\partial x_j} + \dfrac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \\ \mu_t = \rho C_\mu \dfrac{k^2}{\varepsilon} \\ C_\mu = \dfrac{1}{A_0 + A_S U^* k/\varepsilon} \\ A_S = \sqrt{6}\cos\phi \\ \phi = \dfrac{1}{3}\cos^{-1}\left(\sqrt{6}W\right) \\ W = \dfrac{E_{ij}E_{jk}E_{kj}}{\left(E_{ij}E_{ij}\right)^{1/2}} \\ U^* = \sqrt{E_{ij}E_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij}\tilde{\Omega}_{ij}} \\ \tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2\varepsilon_{ijk}\varpi_k \\ \Omega_{ij} = \overline{\Omega_{ij}} - \varepsilon_{ijk}\varpi_k \end{cases} \tag{4-16}$$

式中，G_k 是由于平均速度梯度引起的湍动能产生；G_b 是由于浮力影响引起的湍动能产生；Y_M 为可压缩湍流脉动膨胀对总的耗散率的影响；$C_{1\varepsilon}$、$C_{2\varepsilon}$、$C_{3\varepsilon}$、C_2、A_0 为经验常数，FLUENT 中默认值为 $C_{1\varepsilon}$=1.44、$C_{2\varepsilon}$=1.9、$C_{3\varepsilon}$=0.09、C_2=1.9、A_0=4.0；σ_k、σ_ε 分别为湍动能和湍动耗散率对应的普朗特数，FLUENT 中默认值为 σ_k=1.0、σ_ε=1.2。

该模型适合的流动类型比较广泛，包括有旋均匀剪切流、自由流、腔道流动、边界层流动和有分离的流动等。

双方程模型中，无论是标准 k-ε 模型、RNG k-ε 模型还是 Realizable k-ε 模型，3 个模型有类似的形式，即都有湍动能和耗散率的输运方程，区别在于：

- 计算湍流粘性的方法不同；
- 控制湍流扩散的湍流普朗特数不同；
- 耗散率方程中的产生项和 G_k 关系不同。

4.4 RSM 模型

上述介绍的各种双方程模型都采用各向同性的湍流粘度来计算湍流应力，这些模型很难模拟出旋转流动及流动方向表面曲率变化的影响。为克服这些缺点，有必要直接对雷诺方程中的湍流脉动应力建立微分方程式并进行求解。

雷诺应力模型（RSM 模型）就是求解雷诺应力张量的各个分量的输运方程，具体形式为：

$$\begin{aligned}&\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho\overline{u_i u_j}\right)+\frac{\partial}{\partial x_k}\left(\rho U_k\overline{u_i u_j}\right)=-\frac{\partial}{\partial x_k}\left[\rho\overline{u_i u_j u_k}+\overline{p\left(\delta_{kj}u_i+\delta_{ik}u_j\right)}\right]\\&+\frac{\partial}{\partial x_k}\left(\mu\frac{\partial}{\partial x_k}\overline{u_i u_j}\right)-\rho\left(\overline{u_i u_k}\frac{\partial U_j}{\partial x_k}+\overline{u_j u_k}\frac{\partial U_i}{\partial x_k}\right)-\rho\beta\left(g_i\overline{u_j\theta}+g_j\overline{u_i\theta}\right)\\&+\overline{p\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)}-2\mu\overline{\frac{\partial u_i}{\partial x_k}\frac{\partial u_j}{\partial x_k}}-2\rho\Omega_k\left(\overline{u_j u_m}\varepsilon_{ikm}+\overline{u_i u_m}\varepsilon_{jkm}\right)\end{aligned} \tag{4-17}$$

其中：

$$\begin{cases}D_{ij}^T=\dfrac{\partial}{\partial x_k}\left(\dfrac{\mu_t}{\sigma_k}\dfrac{\partial\overline{u_i u_j}}{\partial x_k}\right)\\ \mu_t=\rho C_\mu\dfrac{k^2}{\varepsilon}\\ \phi_{ij}=\phi_{ij,1}+\phi_{ij,2}+\phi_{ij}^w\\ G_{ij}=\beta\dfrac{\mu_t}{\mathrm{Pr}_t}\left(g_i\dfrac{\partial T}{\partial x_j}+g_j\dfrac{\partial T}{\partial x_i}\right)\\ \varepsilon_{ij}=\dfrac{2}{3}\delta_{ij}\left(\rho\varepsilon+Y_M\right)\end{cases} \tag{4-18}$$

式中，左边第二项为对流项 C_{ij}；右边第一项为湍流扩散项 D_{ij}^{T}；右边第二项为分子扩散项 D_{ij}^{L}；右边第三项为应力产生项 P_{ij}；右边第四项为浮力产生项 G_{ij}；右边第五项为压力应变项 ϕ_{ij}；右边第六项为耗散项 ε_{ij}；右边第七项为系统旋转产生项 F_{ij}；σ_k 为湍动能对应的普朗特数，σ_k=0.82。

RSM 模型也属于高雷诺数湍流计算模型，在固体壁面附近，由于分子粘性的作用，湍流脉动受到阻尼，雷诺数很小，上述方程不再适用。

4.5 LES 模型

湍流包含一系列大大小小的涡团，涡的尺度范围相当宽广。为了模拟湍流流动，我们总希望计算网格的尺度小到足以分辨最小涡的运动，然而，就目前的计算机能力来讲，能够采用的计算网格的最小尺度仍比最小涡的尺度大许多。由于系统中的动量、质量、能量及其他物理量的输运主要由大尺度涡影响，因此假设流动的几何和边界条件决定了大涡的特性，而流动特性主要在大涡中体现，小涡受几何和边界条件的影响较小，并且各向同性，所以计算时直接求解大涡，这种方法就是大涡模型（LES 模型）。

LES 模型的控制方程是对 N-S 方程在波数空间或物理空间进行过滤得到的。过滤的过程是去掉比过滤宽度或给定物理宽度小的涡旋，从而得到大涡旋的控制方程为：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+u\frac{\partial \rho\overline{u_i}}{\partial x_i}=0 \tag{4-19}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho\overline{u_i}\right)+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho\overline{u_i u_j}\right)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(u\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j}\right)-\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_j}-\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \tag{4-20}$$

式中，τ_{ij} 为亚网格应力，$\tau_{ij}=\rho\overline{u_i u_j}-\rho\overline{u_i}\cdot\overline{u_j}$。

【实例 4-1】：三角翼绕流分析

河道中的桥墩、轮船及船桨等都会对正常的水流流动造成一定程度的影响，若绕流前后压差过大，则容易使障碍物产生振动，当振动频率与物体某阶固有频率相当时，则会使物体扭曲，甚至断裂，后果不堪设想。因此，正确分析障碍物对来流的影响是工程实际中的一个重要问题，本例即分析水流湍流绕过三角翼时的流场。

一、实例概述

三角翼的形状如图 4-2 所示，水从左边正前方（0 攻角）以速度 5m/s 绕过，分析三角翼对水流正常流动的影响。

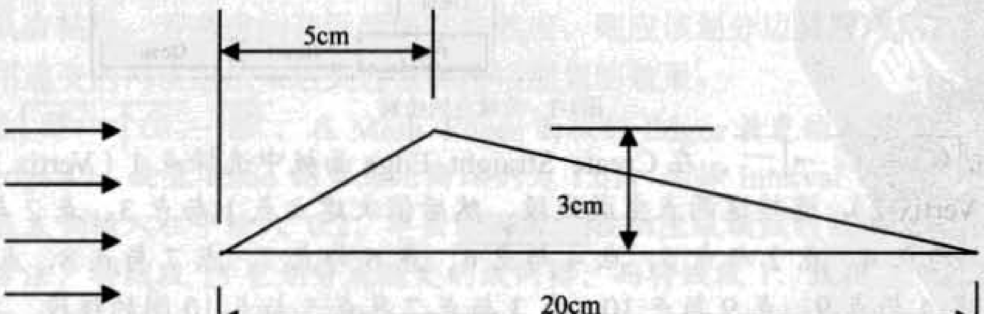


图4-2 三角翼绕流示意图

思路分析

由于水流绕过三角翼为外流，因此需要建立三角翼外围流域，横向长度取三角翼长的 5 倍，纵向长度取三角翼高度的 20 倍。

通过本实例的演示过程，读者将学习到：

- 外流区域的建立；
- 几何面的相减；
- 几何区域的分块；
- 递变网格的划分；
- 压力出口的定义；
- 参考值设置；
- 设置压力系数监视器；
- 计算结果的后处理。

结果文件——参见附带光盘“Ch4\sl4-1.msh”、“Ch4\sl4-1.dbs”、“Ch4\sl4-1.jou”、“Ch4\sl4-1.trn”、“Ch4\sl4-1.cas”、“Ch4\sl4-1.dat”。

动画演示——参见附带光盘“Ch4\AVI\sl4-1.avi”。

二、模型建立

1. 启动 GAMBIT，单击控制面板中的 → → ，在 Create Real Vertex 面板的 x、y、z 坐标输入栏中输入（-5，0，0），单击 Apply 按钮生成第一个点。随后按同样方法依次建立点（15，0，0）、点（0，3，0）、点（-40，0，0）、点（60，0，0）、点（-40，30，0）、点（0，30，0）、点（60，30，0）、点（-40，-30，0）和点（60，-30，0）共 10 个点，如图 4-3 所示。

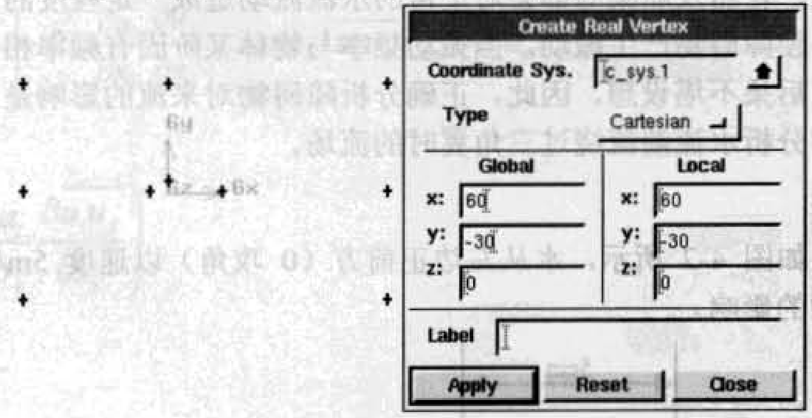


图4-3 流域点的绘制

2. 单击 → → ，在 Create Straight Edge 面板中选择点 1（Vertix.1）与点 2（Vertix.2），连接这两点生成线段，然后依次建立点 1 与点 3、点 2 与点 3、点 1 与点 4、点 2 与点 5、点 4 与点 6、点 6 与点 7、点 7 与点 8、点 5 与点 8、点 4 与点 9、点 9 与点 10、点 3 与点 7 及点 5 与点 10 间的线段，共 13 条线段，如图 4-4 所示。

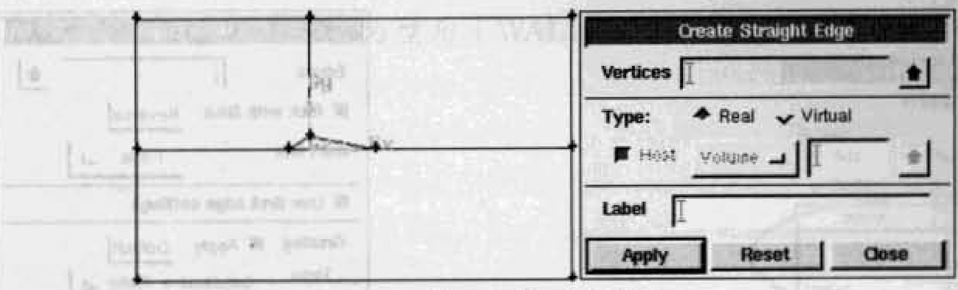


图4-4　流域线的绘制

3. 单击→→，在 Create Face from Wireframe 面板中完成需要创建的面，本例要创建 3 个面，分别由线段 2（edge.2）、线段 4、线段 6、线段 7、线段 13 组成，线段 3、线段 5、线段 8、线段 9、线段 13 组成和线段 1、线段 4、线段 5、线段 10、线段 11、线段 12 组成，如图 4-5 所示。

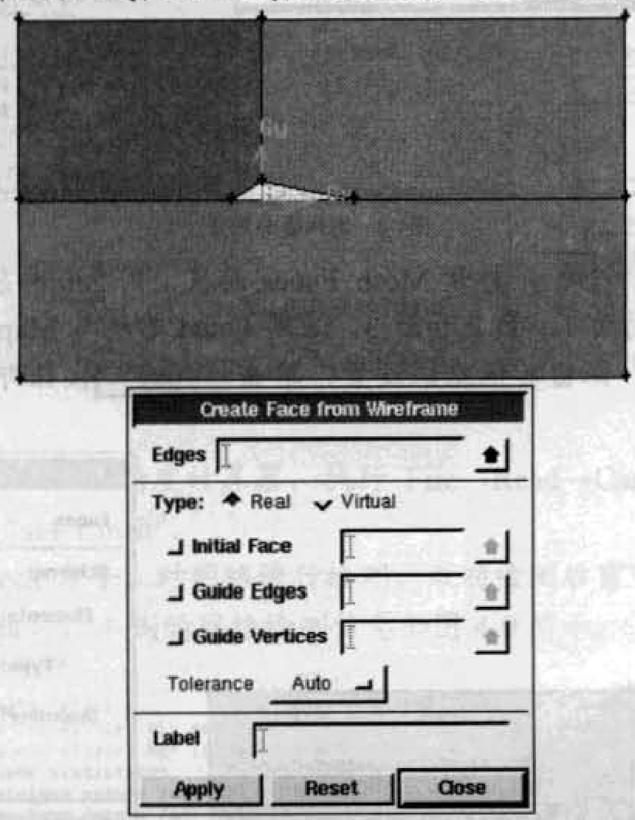


图4-5　流域面的绘制

面域创建完后，下步需要对几何模型进行网格的划分。

三、网格划分

由于水具有粘性，若考虑到其近壁面粘性效应，则应该划分边界层网格，本例不划分边界层，而采用递变的网格划法来达到近壁面网格细划的效果。

1. 单击→→，在 Mesh Edges 面板的 Edges 黄色输入栏中选中线段 4（edge.4），设置 Ratio 的节点距离比例为 1.01，选择 Interval Size 分段方式，并在左侧输入栏中输入 0.2，单击 Apply 按钮生成该线的线网格。按照同样的方法，将线段 13 也划分成递变的线网格。而将线段 1、线段 2、线段 3、线段 5 和线段 10 以等间距比例（即 Ratio 为 1）、Size 为 0.2 的方式划分，剩下线段则不用划分线网格，得出的线网格如图 4-6 所示。

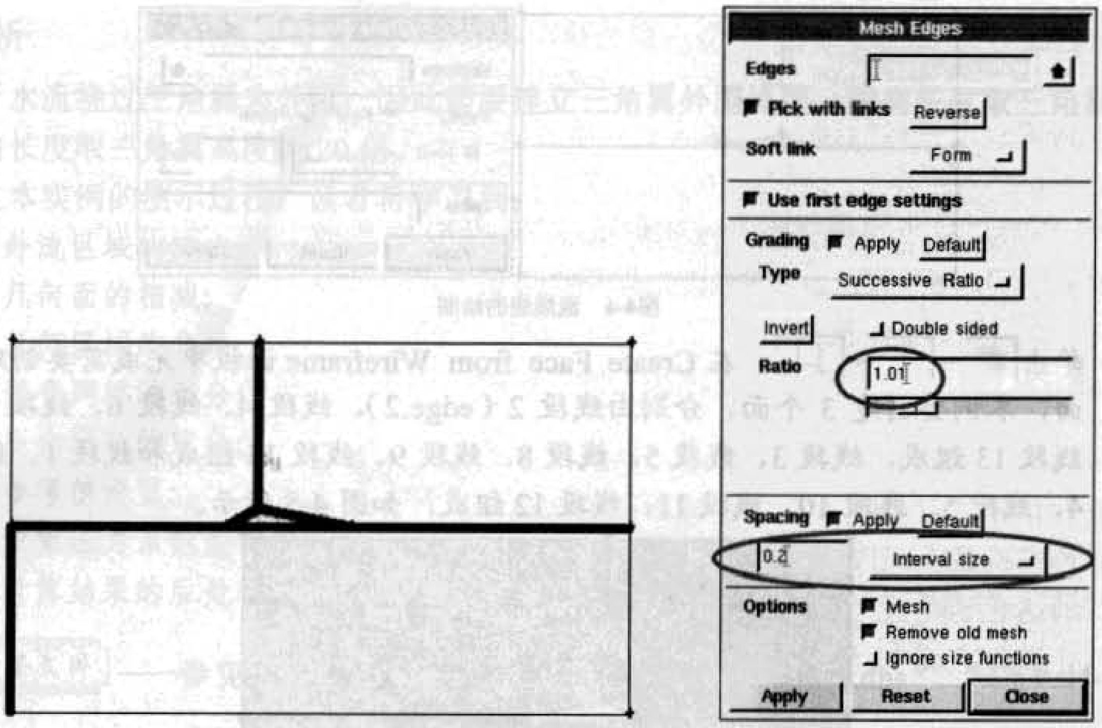


图4-6　线网格的划分

2. 单击 → → ，打开 Mesh Faces 面板，用 Shift+鼠标左键选中已经完成线网格划分的面 1、面 2 和面 3，运用 Quad 单元与 Map 方法对这 3 个面进行面网格划分，保留其他默认设置，单击 Apply 按钮即可，其网格生成如图 4-7 所示。

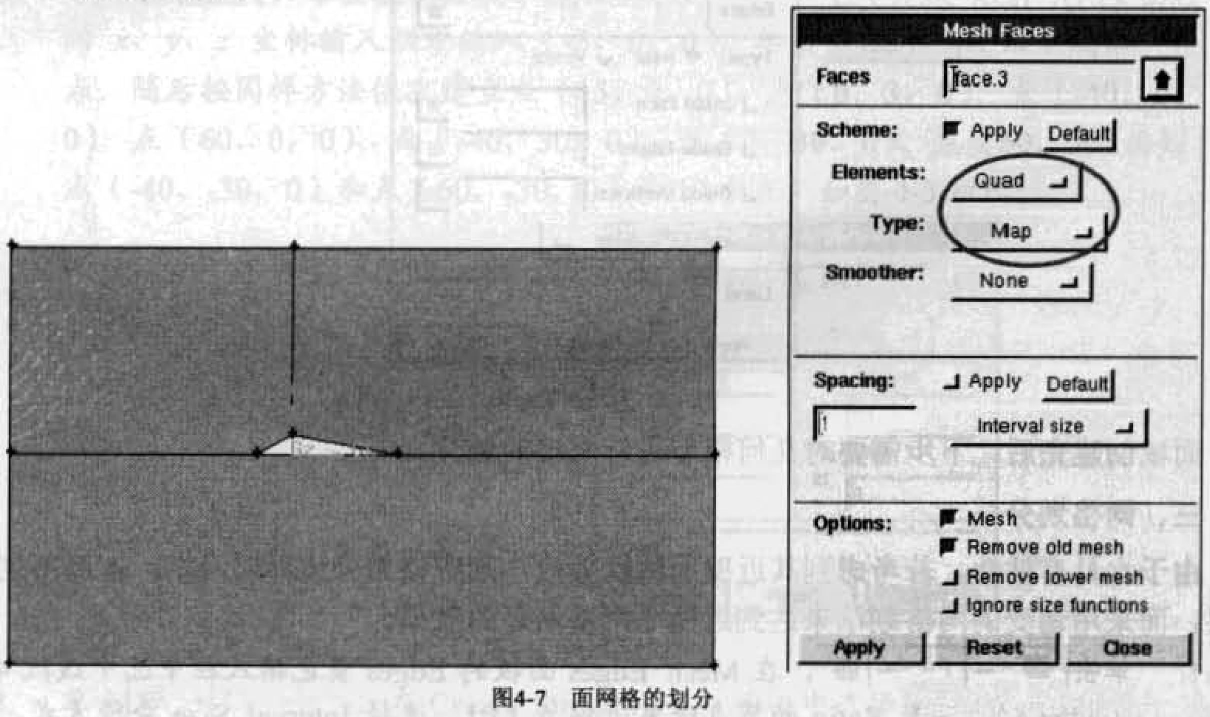


图4-7　面网格的划分

面网格划分好后，需要定义边界类型。

3. 单击 → ，在 Specify Boundary Types 面板中将线段 6 和线段 10 定义为速度入口（VELOCITY_INLET），名称为 in，将线段 7、线段 8、线段 9、线段 11 和线段 12 定义为压力出口（PRESSURE_OUT），名称为 out，将线段

1、线段 2 和线段 3 定义为壁面（WALL），名称为 bimian，如图 4-8 所示。

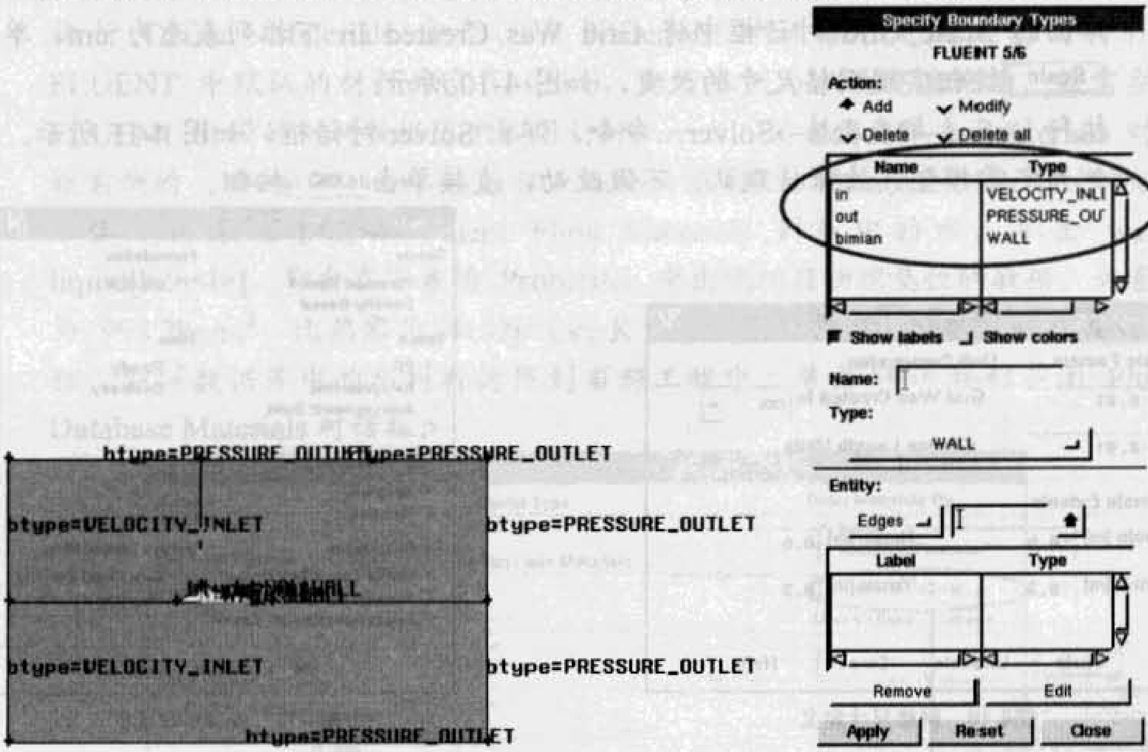


图4-8　边界类型的定义

4. 网格划分完后，执行 File→Export→Mesh 命令，将网格输出为 sl4-1.msh。

四、求解计算

1. 启动 FLUENT 二维单精度计算器，执行 File→Read→Case...命令，读入划分好的网格文件 “sl4-1.msh”。

2. 执行 Grid→Check 命令，对网格进行检测，成功检测后窗口界面中最后一行会出现 “Done” 语句，本例的网格检测信息如图 4-9 所示。

```
Grid Check

 Domain Extents:
   x-coordinate: min (m) = -4.000000e+001, max (m) = 6.000000e+001
   y-coordinate: min (m) = -3.000000e+001, max (m) = 3.000000e+001
 Volume statistics:
   minimum volume (m3): 9.261990e-003
   maximum volume (m3): 9.296635e-002
     total volume (m3): 5.970000e+003
 Face area statistics:
   minimum face area (m2): 7.439232e-002
   maximum face area (m2): 4.201889e-001
 Checking number of nodes per cell.
 Checking number of faces per cell.
 Checking thread pointers.
 Checking number of cells per face.
 Checking face cells.
 Checking bridge faces.
 Checking right-handed cells.
 Checking face handedness.
 Checking face node order.
 Checking element type consistency.
 Checking boundary types:
 Checking face pairs.
 Checking periodic boundaries.
 Checking node count.
 Checking nosolve cell count.
 Checking nosolve face count.
 Checking face children.
 Checking cell children.
 Checking storage.
Done.
```

图4-9　网格检测信息

3. GAMBIT 默认单位为 m，而本例单位为 cm，所以执行 Grid→Scale...命令，在弹出的 Scale Grid 对话框中将 Grid Was Created In 下拉列表选为 cm，单击 Scale 按钮实现网格尺寸的改变，如图 4-10 所示。
4. 执行 Define→Models→Solver...命令，弹出 Solver 对话框，如图 4-11 所示。本例为定常模型，故保持默认，不做改动，直接单击 OK 按钮。

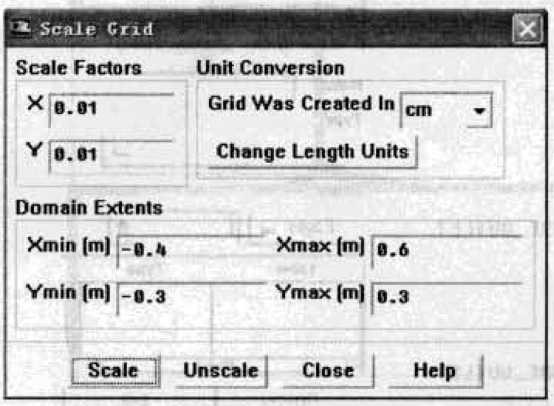


图4-10　网格尺寸定义

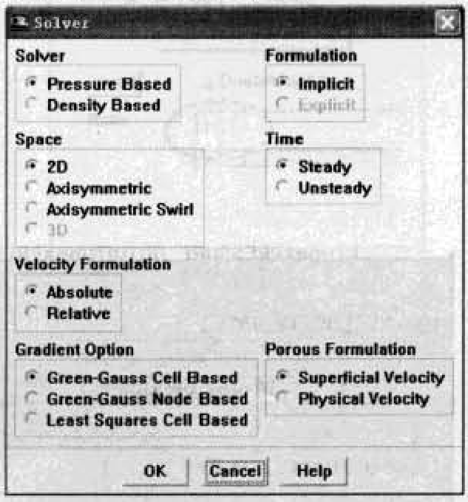


图4-11　Solver 对话框

5. 执行 Define→Models→Viscous...命令，弹出 Viscous Model 对话框，如图 4-12 所示。FLUENT 中默认的为层流模型，因本例为湍流流动，故需做相应的设置。本例选择具有非平衡壁面函数的标准 *k-ε* 模型，在 Model 选项中选择 k-epsilon[2 eqn]，在 k-epsilon Model 选项下选择 Standard，在 Near-Wall Treatment 选项下选择 Non-Equilibrium Wall Functions，保留其他默认设置，单击 OK 按钮，如图 4-13 所示。

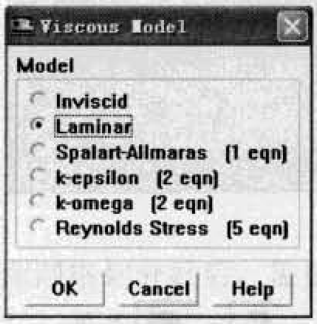


图4-12　Viscous Model 对话框

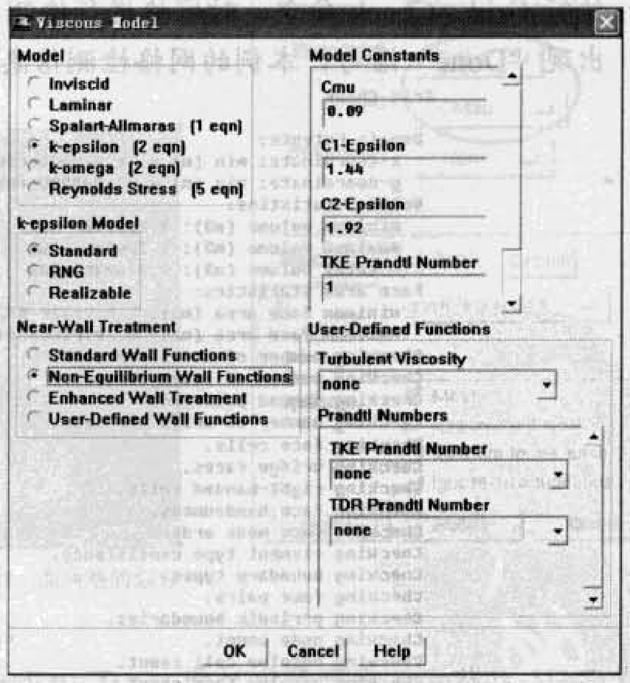


图4-13　湍流模型的设置

注意：定常流动时，湍流模型对话框找不到 LES 模型，这是因为大涡模型为非定常流动的模拟模型。

模型设置完后，下一步就是定义流体的材料。

6. 执行 Define→Materials 命令，在 Materials 对话框中定义流动的材料。FLUENT 中默认的材料为空气（air），由于本例为水的绕流流动，故需要从 FLUENT 自带的材料数据库中调用材料——水。读者需要单击 Materials 对话框右侧的 Fluent Database... 按钮，在弹出的 Fluent Database Materials 对话框中，利用滚动条选择 Fluent Fluid Materials 列表中的水，单击 water-liquid[h2o<l>]，即会在下方的 Properties 中出现相应物理属性的数据，如密度为 998.2kg/m^3，比热容为 4182j/（kg·K）等，如图 4-14 所示。单击 Copy 按钮，即将数据库中的水材料拷贝到当前工程中。单击 Close 按钮关闭 Fluent Database Materials 对话框。

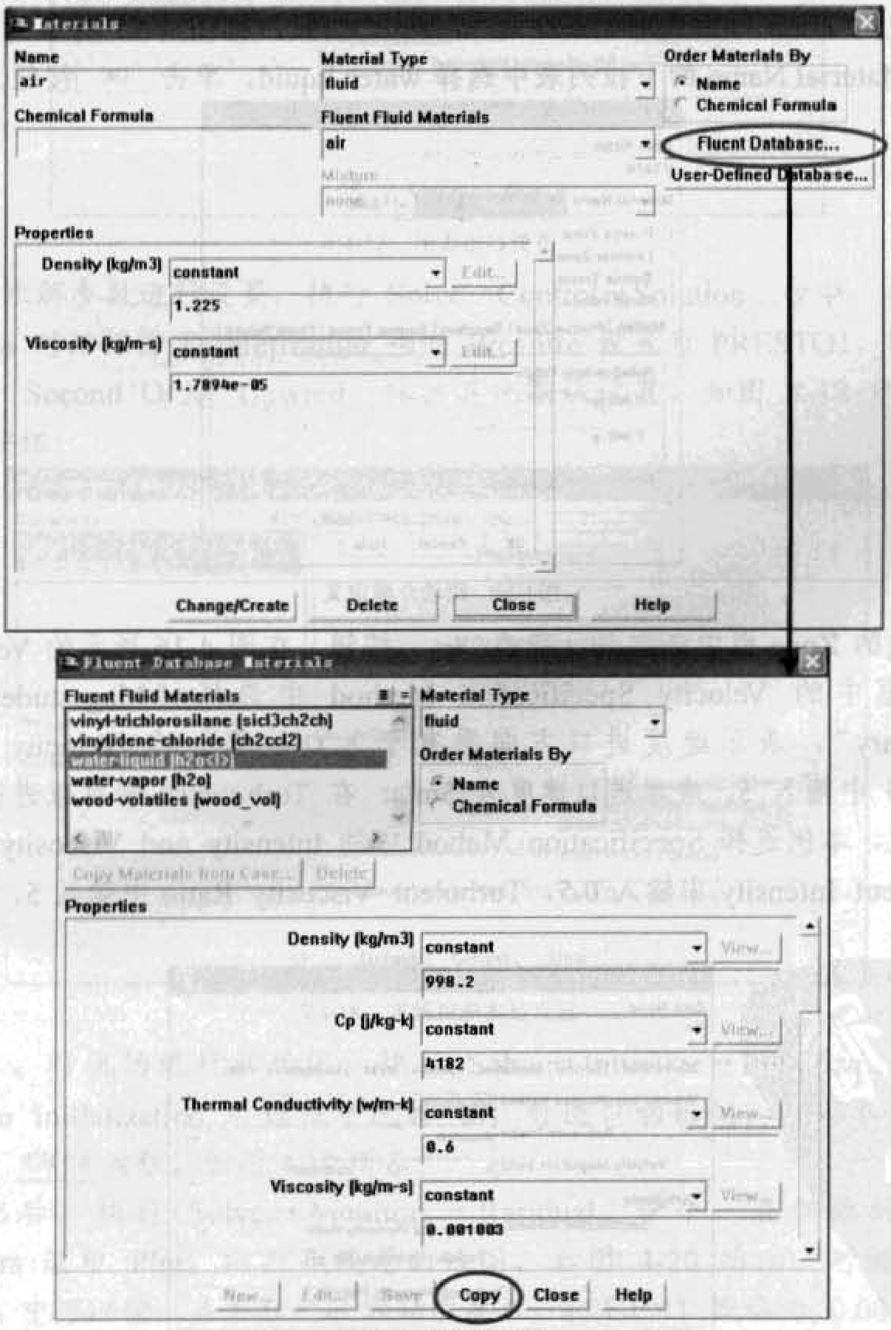


图4-14　材料的定义

回到 Materials 对话框，即会发现在 Fluent Fluid Materials 下拉列表中存在了空气和水两

种材料，本例选择为水。最后单击 Materials 对话框中的 Close 按钮，完成材料的定义。

注意：若不考虑热效应，在 Materials 对话框的材料属性中找不到比热容和导热系数等无形参数，并不代表材料数据的不齐全。

7. 执行 Define→Operating Conditions 命令，在 Operating Conditions 对话框中设置工作压强。FLUENT 中默认为 1atm，参考位置为原点（0，0），且不考虑 Gravity 作用，本例保持默认设置，单击 OK 按钮。
8. 工作压强设置完后，需要定义边界数据，执行 Define→Boundary Conditions... 命令，弹出 Boundary Conditions 对话框，定义如下内容。

- 在左边的 Zone 框中选中 fluid，单击 Set... 按钮，在图 4-15 所示的 Fluid 对话框中 Material Name 的下拉列表中选择 water-liquid，单击 OK 按钮。

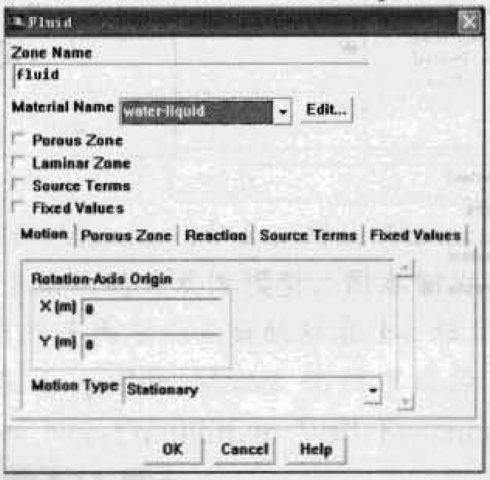


图4-15　流动介质定义

- 在左边的 Zone 框中选中 in，单击 Set... 按钮，在图 4-16 所示的 Velocity Inlet 对话框中的 Velocity Specification Method 中选择"Magnitude,Normal to Boundary"，表示速度进口方向垂直于入口边界；在 Velocity Magnitude（m/s）中输入 5，表示进口速度为 5m/s；在 Turbulence 中可以进行湍流参数的设置，本例选择 Specification Mehod 中的 Intensity and Viscosity Ratio，在 Turbulent Intensity 中输入 0.5，Turbulent Viscosity Ratio 中输入 5，单击 OK 按钮。

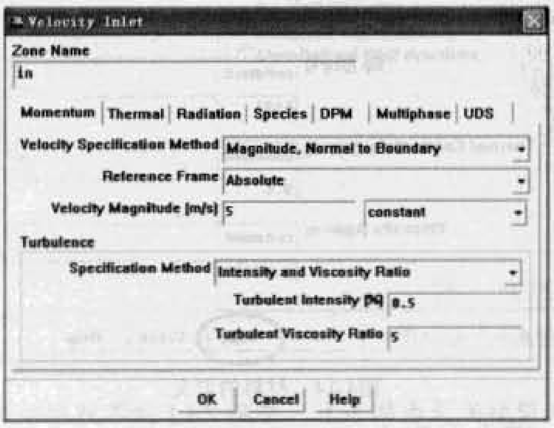


图4-16　速度入口设置

- 在左边的 Zone 框中选中 out，单击 Set...，在图 4-17 所示的 Pressure Outlet 对话框中选择 Specification Mehod 中的 Intensity and Viscosity Ratio，在 Backflow Turbulent Intensity 中输入 0.5，Backflow Turbulent Viscosity Ratio 中输入 5，其余保持默认，单击 OK 按钮。

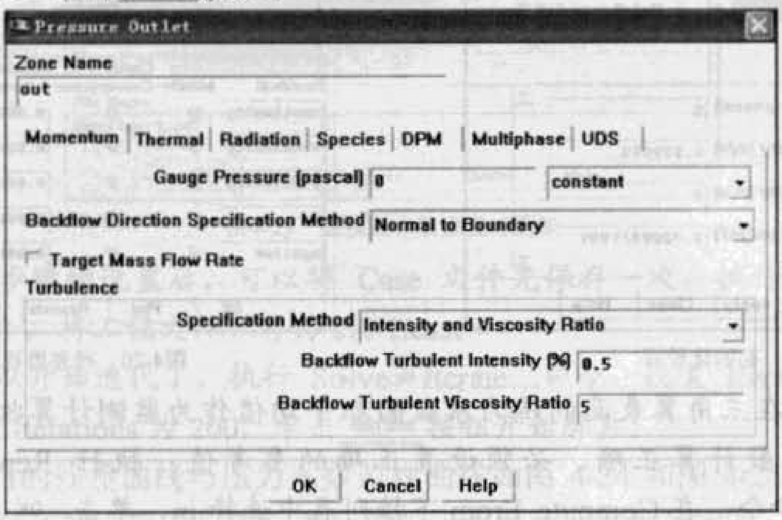


图4-17　压力出口设置

9. 下面对求解参数进行设置，执行 Solve→Control→Solution...命令，在 Solution Controls 对话框将 Discretization 项的 Pressure 设置为 PRESTO!，Momentum 设置为 Second Order Upwind，保持其他默认设置，如图 4-18 所示，单击 OK 按钮。

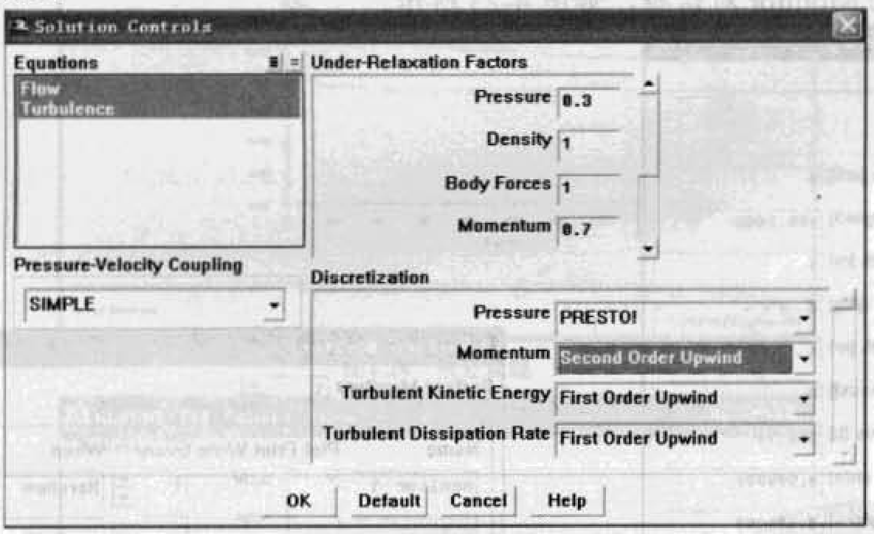


图4-18　求解控制参数设置

10. 接下来，对流场进行初始化，执行 Solve→Initialize→Initialize...命令，在 Solution Initialization 对话框中选择 in，对进口初始化，顺序单击 Init、Apply、Close 按钮，如图 4-19 所示。

11. 初始化后，执行 Solve→Monitors→Residual...命令，在弹出的 Residual Monitors 选中 Plot，以打开残差曲线图，如图 4-20 所示。对话框下方的 Criteria 中可以输入各参数的收敛精度要求，FLUENT 默认为 0.001，本例将 continuity 设置为 0.01。

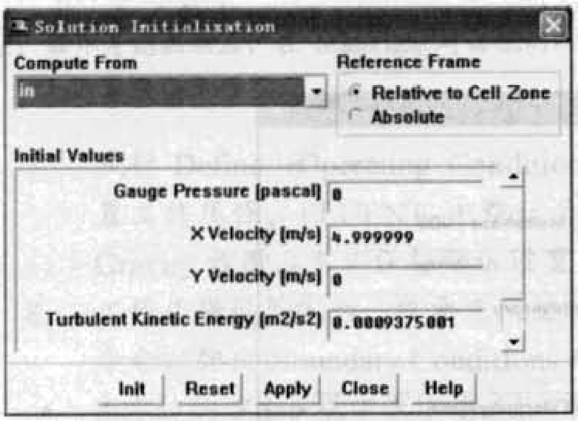


图4-19 初始化设置

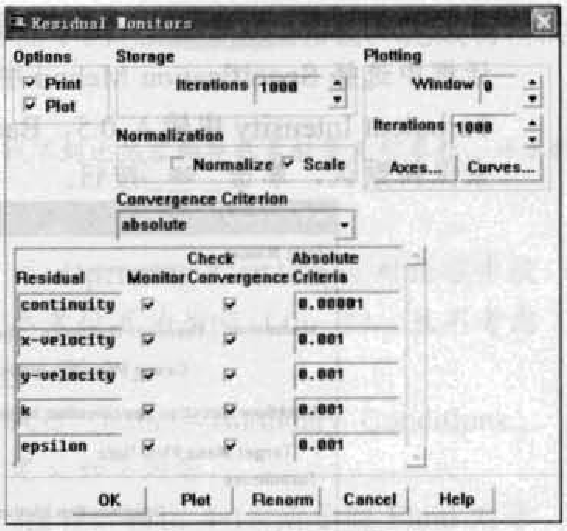


图4-20 残差监视器设置

12. 选取作用在三角翼表面的压力系数面积平均值作为监测计算收敛的判据。为使压力系数计算正确，必须设置正确的参考值。执行 Report→Reference Values…命令，在 Compute From 下拉列表中选择 in，单击 OK 按钮，如图 4-21 所示。

13. 参考值设置完后，即可设置压力系数监视器，执行 Solve→Monitors→Surface…命令，弹出 Surface Monitors 对话框，如图 4-22 所示。增加 Surface Monitors 值为 1，单击 Plot 和 Write，单击右侧的 Define... 按钮，打开 Define Surface Monitor 对话框，如图 4-23 所示。

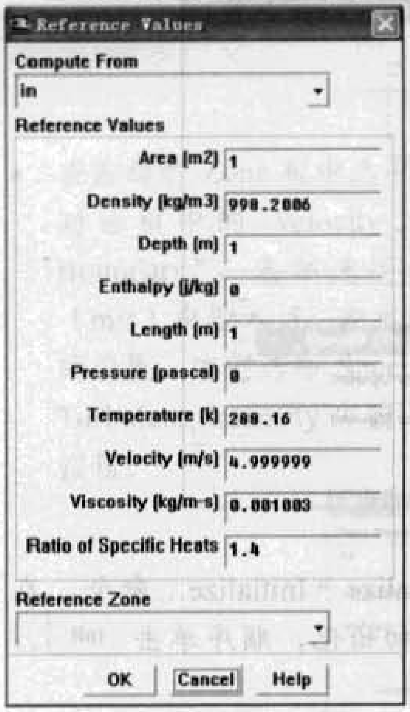


图4-21 参考值设置

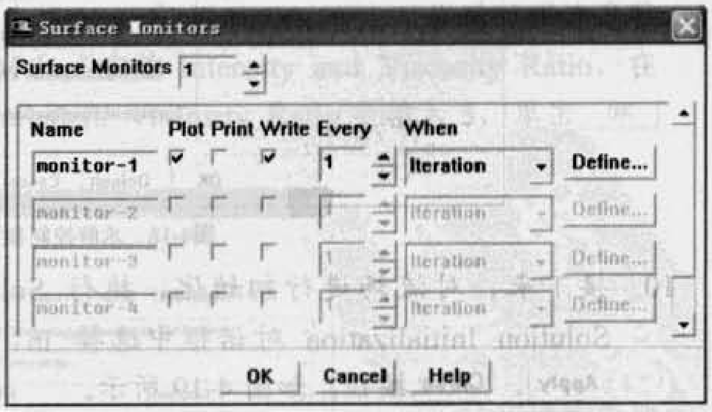


图4-22 监视器对话框

14. 在 Define Surface Monitor 对话框，选择 Report of 下拉列表中的 Pressure 和 Pressure Coefficient，选中 Surfaces 列表中的 bimian，将 Report Type 设置为 Area-Weighted Average，保留其他默认设置，单击 OK 按钮，如图 4-23 所示。退回到 Surface Monitors 对话框，再次单击 OK 按钮。

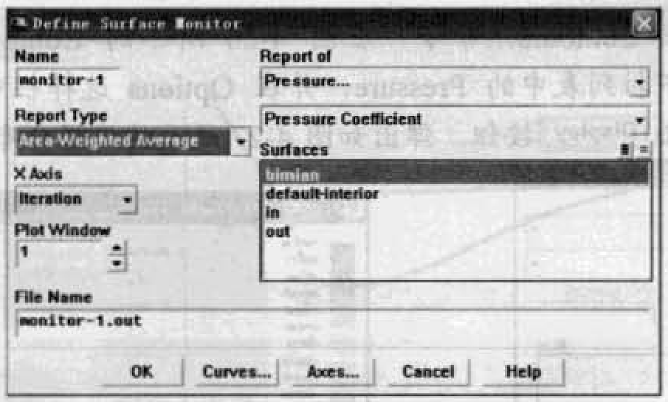


图4-23 监视器参数设置对话框

15. 完成上述步骤的设置后，可以将 Case 文件先保存一次，执行 File→Write→Case...命令，将工程文件保存为 sl4-1.cas。

16. 下面即可以开始迭代了，执行 Solve→Iterate...命令，设置 Iterate 对话框中的 Number of Iterations 为 200，单击 **Iterate** 按钮开始解算。

200 步计算完后的残差曲线与压力系数监视曲线如图 4-24 和图 4-25 所示。尽管从残差曲线看，问题还没有达到设置的收敛要求，但由压力系数监视曲线可见，压力系数已无明显波动，可以认为已经收敛。

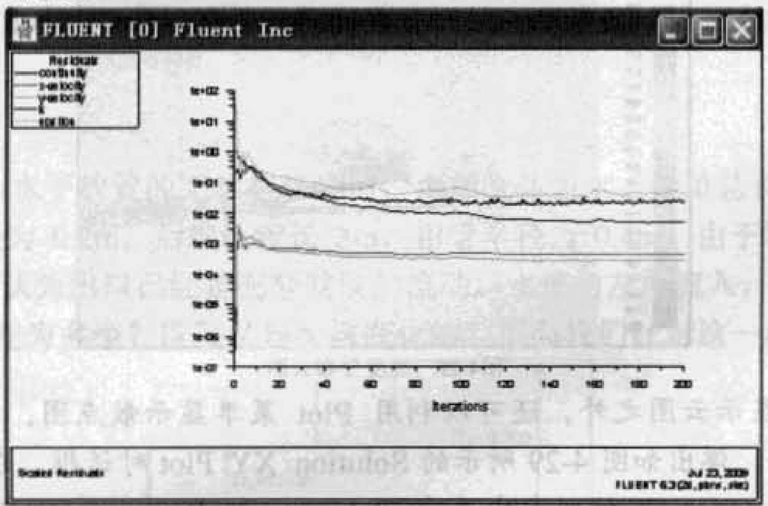


图4-24 残差曲线

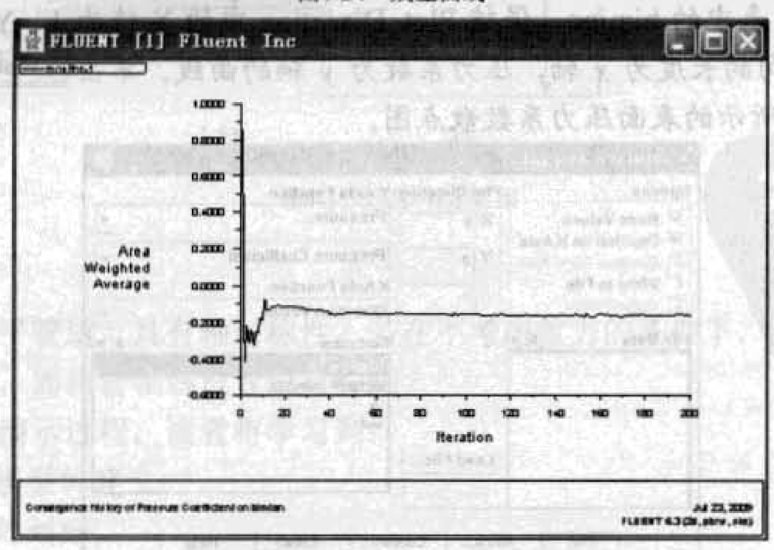


图4-25 压力系数监视曲线

17. 执行 Display→Contours...命令，在图 4-26 所示的 Contours 对话框中选择 Contours of 下拉列表中的 Pressure，并在 Options 选择栏中的 Filled 前单击（打勾），单击 Display 按钮，弹出如图 4-27 所示的压强分布云图。



图4-26　Contours 对话框

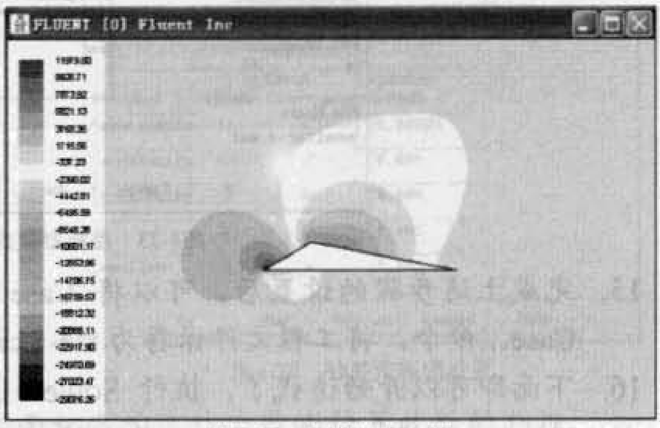


图4-27　压强分布云图

18. 同样，选择 Contours of 下拉列表中的 Velocity，单击 Display 按钮，可弹出如图 4-28 所示的速度分布云图。

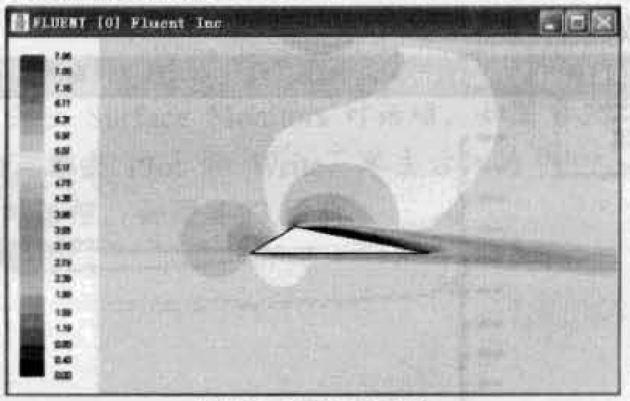


图4-28　速度分布云图

19. 除了可以显示云图之外，还可以利用 Plot 菜单显示散点图。执行 Plot→XY Plot...命令，弹出如图 4-29 所示的 Solution XY Plot 对话框，在该对话框中的 Y Axis Function 下拉列表中选中 Pressure 和 Pressure Coefficient，并选中 Surfaces 列表中的 bimian，保持 Plot Direction 中的 X 值为 1、Y 值为 0，即建立以 x 方向的长度为 x 轴，压力系数为 y 轴的曲线。单击 Plot 按钮即弹出如图 4-30 所示的表面压力系数散点图。

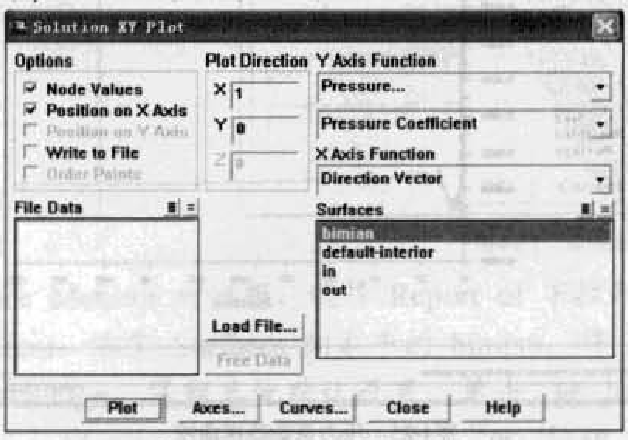


图4-29　XY 曲线设置对话框

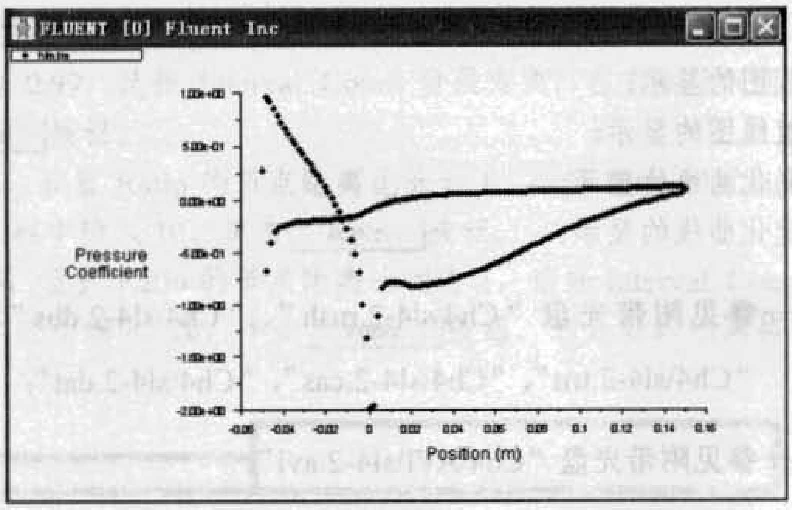


图4-30　三角翼表面压力系数分布图

20. 最后，将计算结果保存为 case 和 data 文件。执行 File→Write→Case&Data…命令，保存 sl4-1.cas 和 sl4-1.dat。执行 File→Exit 命令，安全退出 FLUENT。

【实例 4-2】：突扩管内流体流动分析

在实际工程的管道输送中，经常会遇到突扩或突缩管的情况，当流体经过这样的突然扩张或突然收缩的管道时，流动将与管壁发生分离，并形成漩涡，从而造成了压强的损失，消耗了管输的能量。

一、实例概述

图 4-31 所示为水平放置的突然扩张管道，内部流体为水。管道总长为 4.5m，前端细管长 1.5m，细管半径为 0.2m，后端粗管长 3m，粗管半径为 0.4m。由于管长和台阶高度的比值为 15，因此可以认为出口已经是充分发展的流动。水流由左端流入，速度为 5cm/s，那么经过突扩管后流速变为多少？压强又是如何变化的？下面我们针对这一问题进行模拟计算。

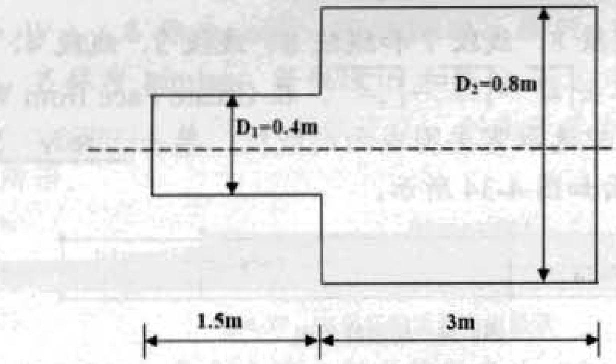


图4-31　突扩管示意图

思路分析

由于本例为水平管道，具有轴对称性，若在不考虑重力的条件下，实际建模时可以只建立轴向剖面的一半，而将管轴线设置成对称轴。

通过本实例的演示过程，读者将学习到：

- 二维对称模型的建立；
- 分区网格的划分；
- 流态的判断；

- 镜像显示;
- 速度等值线图的显示;
- 流函数等值线图的显示;
- 速度沿程变化曲线的显示;
- 压强沿程变化曲线的显示。

结果文件——参见附带光盘"Ch4\sl4-2.msh"、"Ch4\sl4-2.dbs"、"Ch4\sl4-2.jou"、"Ch4\sl4-2.trn"、"Ch4\sl4-2.cas"、"Ch4\sl4-2.dat";

动画演示——参见附带光盘"Ch4\AVI\sl4-2.avi"。

二、模型建立

1. 启动 GAMBIT,单击 → → ,依次创建坐标为(0,0,0)、(0,0.2,0)、(1.5,0.2,0)、(1.5,0.4,0)、(4.5,0.4,0)、(4.5,0,0)和(1.5,0,0)的 7 个点,如图 4-32 所示。



图4-32 绘制好的点

2. 单击 → → ,打开 Create Straight Edge 面板,创建点 1(Vertix.1)与点 2(Vertix.2)、点 2 与点 3、点 3 与点 4、点 4 与点 5、点 5 与点 6、点 6 与点 7、点 1 与点 7、点 3 与点 7 之间的线段,共 8 条线段,如图 4-33 所示。



图4-33 绘制好的线段

3. 将线段 1、线段 2、线段 8、线段 7 和线段 8、线段 3、线段 4、线段 5、线段 6 分别组成两个面,单击 → → ,在 Create Face from Wireframe 面板的 Edges 黄色输入栏中选取需要围成面的线段,单击 Apply 按钮生成几何面。本例生成的两个面如图 4-34 所示。



图4-34 绘制好的面

三、网格划分

1. 单击 → → ,在 Mesh Edges 面板的 Edges 黄色输入栏中选中线段 1(edge.1)和线段 8,红色箭头由下向上,设置 Ratio 的节点距离比例为 0.95,选择 Interval Count 分段方式,在左侧输入栏中输入 10,单击 Apply 按钮生成该线的线网格,其余线段划分方式如下。

- Shift+鼠标左键选中线段 2 和线段 7,红色箭头由左向右,设置 Ratio 的节点距离比例为 0.99,选择 Interval Count 分段方式,在左侧输入栏中输入 200,单击 Apply 按钮。

- Shift+鼠标左键选中线段 4 和线段 6，红色箭头由右向左，设置 Ratio 的节点距离比例为 0.99，选择 Interval Count 分段方式，在左侧输入栏中输入 300，单击 Apply 按钮。
- 选中线段 3，设置 Ratio 的节点距离比例为 1，选择 Interval Count 分段方式，在左侧输入栏中输入 10，单击 Apply 按钮。
- 选中线段 5，设置 Ratio 的节点距离比例为 1，选择 Interval Count 分段方式，在左侧输入栏中输入 20，单击 Apply 按钮。划分好的线网格如图 4-35 所示。



图4-35 线网格的划分

注意：Shift+鼠标左键选中被选线段，按住鼠标中键，可以使被选线段的红色箭头改变方向。

2. 单击 → → ，打开 Mesh Faces 面板，选中已经完成线网格划分的面 1 和面 2，运用 Quad 单元与 Map 方法对这两个面进行划分，其他设置保持默认，其生成的面网格如图 4-36 所示。此面网格体现了固体边界突然变化部位网格细划的效果。

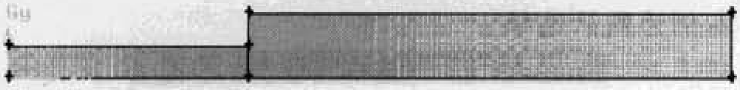


图4-36 划分好的面网格

面网格划分好后，定义本例的边界条件类型。

3. 单击 → ，在 Specify Boundary Types 面板中将线段 1 定义为速度入口（VELOCITY_INLET），名称为 in；将线段 5 定义为自由出流（OUTFLOW），名称为 out；将线段 2、线段 3 和线段 4 定义为壁面（WALL），名称为 bimian；将线段 6 和线段 7 定义为对称轴边界（AXIS），名称为 duichenzhou；线段 8 不做定义，则表示其为内部区域，定义好的边界如图 4-37 所示。



图4-37 定义好的边界类型显示

4. 执行 File→Save As...命令，将工程文件保存为“sl4-2”。同时，执行 Export→Mesh 命令，输出网格文件 sl4-2.msh。

四、求解计算

1. 启动 FLUENT 二维单精度计算器，执行 File→Read→Case...命令，读入划分好的网格文件“sl4-2.msh”。读入网格文件之后，FLUENT 控制台窗口会提示图 4-38 所示的警告信息，意为提示我们将问题修改为轴对称问题。

```
Warning: The use of axis boundary conditions is not appropriate for
         a 2D/3D flow problem. Please consider changing the zone
         type to symmetry or wall, or the problem to axisymmetric.

Warning: The use of axis boundary conditions is not appropriate for
         a 2D/3D flow problem. Please consider changing the zone
         type to symmetry or wall, or the problem to axisymmetric.
```

图4-38　警告信息

2. 网格读入之后，执行 Grid→Check 命令，检查网格的信息，如图 4-39 所示。Domain Extents 显示了计算区域的大小，Volume Statistics 显示了最小和最大体积，Face area statistics 显示了最小和最大面积。如果出现了负体积网格，则必须重新划分网格。

```
Domain Extents:
  x-coordinate: min (m) = 0.000000e+000, max (m) = 4.500000e+000
  y-coordinate: min (m) = 0.000000e+000, max (m) = 4.000000e-001
Volume statistics:
  minimum volume (m3): 2.454675e-005
  maximum volume (m3): 6.317577e-004
    total volume (m3): 1.500000e+000
Face area statistics:
  minimum face area (m2): 1.562715e-003
  maximum face area (m2): 3.154736e-002
```

图4-39　网格检查的信息

3. 执行 Grid→Scale…命令，弹出 Scale Grid 对话框，本例不需要重新定义网格的尺寸，但是仍可以从对话框中看出计算区域的尺寸范围。
4. 执行 Define→Models→Solver…命令，在图 4-40 所示的 Solver 对话框中选择计算模型，本例为默认选择。

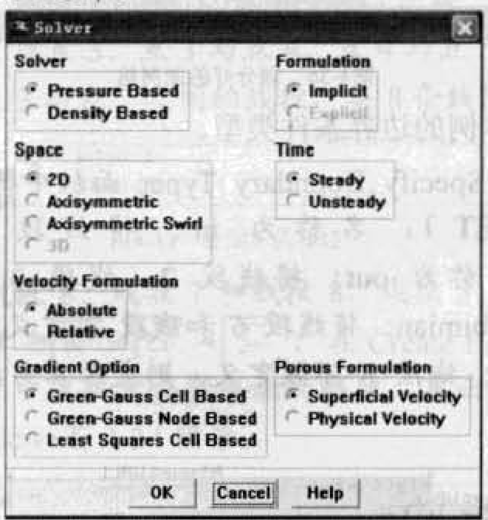


图4-40　基本模型选择

5. 本例来流速度为 0.05m/s，计算雷诺数 $Re=\frac{vd}{\upsilon}=\frac{0.05\times0.4}{10^{-6}}=20000>2000$，因此，管内为湍流流动，故执行 Define→Models→Viscous…命令，在弹出的如图 4-41 所示的 Viscous Model 对话框的 Model 选项中选择 k-epsilon[2 eqn]，在 k-epsilon Model 选项下选择 Standard，其他参数取为默认值，单击 OK 按钮。
6. 本例材料与上例一样，仍为水，参照上例操作完成水材料的定义。
7. 由于本例不考虑重力作用，因此执行 Define→Operating Conditions 命令，不需要设置图 4-42 所示的 Operating Conditions 对话框中的 Gravity，操作压强默认为一个大气压，位置默认为原点（0，0），单击 OK 按钮。

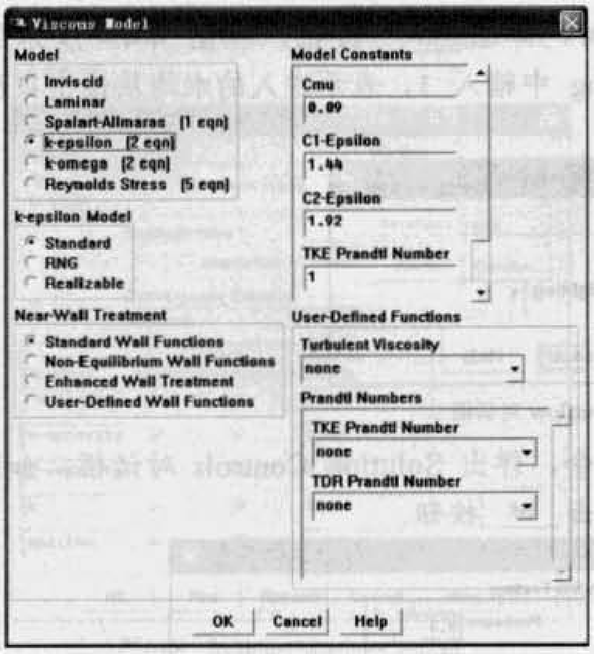


图4-41 湍流模型选择对话框

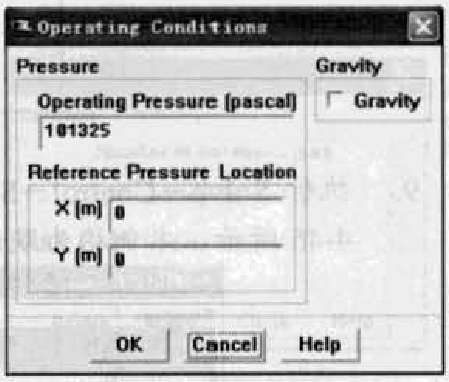


图4-42 Operating Conditions 对话框

8. 定义边界数据。执行 Define→Boundary Conditions…命令，在 Boundary Conditions 对话框中进行定义。左边的 Zone 为待定义的边界名称，右边则为对应的边界类型。本例需要定义的主要有“fluid”、“in”和“out”3 个边界条件。

- 选择 fluid，其类型 Type 为 fluid，单击 Set… 按钮，在图 4-43 所示的 Fluid 对话框中的 Material Name 下拉列表中选择 water-liquid，单击 OK 按钮。
- 选择 in，其类型 Type 为 velocity-inlet，单击 Set… 按钮，在图 4-44 所示的 Velocity Inlet 对话框中的 Velocity Specification Method 中选择“Magnitude,Normal to Boundary”，表示速度进口方向垂直于入口边界；在 Velocity Magnitude（m/s）中输入 0.05，表示进口速度为 5cm/s；在 Turbulence 中可以进行湍流参数的设置，本例选择 Specification Mehod 中的 Intensity and Hydraulic Diameter；在 Turbulent Intensity 中输入 1，Hydraulic Diameter 中输入 0.4；最后单击 OK 按钮完成速度进口 in 的设置。

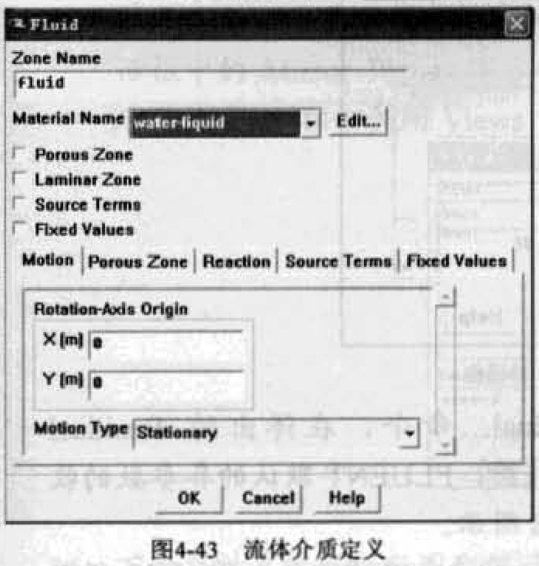


图4-43 流体介质定义

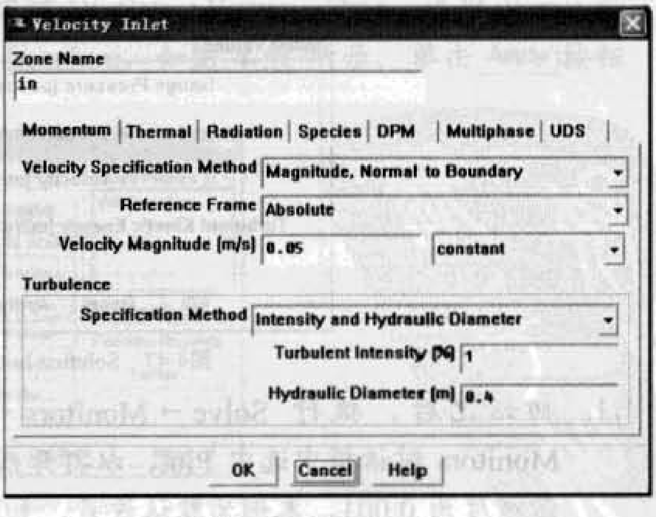


图4-44 速度进口定义

- 选择 out，其类型 Type 为 outflow，单击 Set... 按钮，在图 4-45 所示的 Outflow 对话框 Flow Rate Weighting 中输入 1，表示进入的水均从该出口流出。

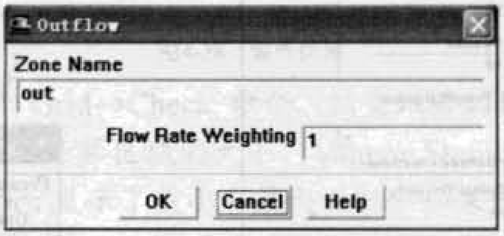


图4-45 Outflow 对话框

9. 执行 Solve→Control→Solution...命令，弹出 Solution Controls 对话框，如图 4-46 所示，本例均为默认设置，单击 OK 按钮。

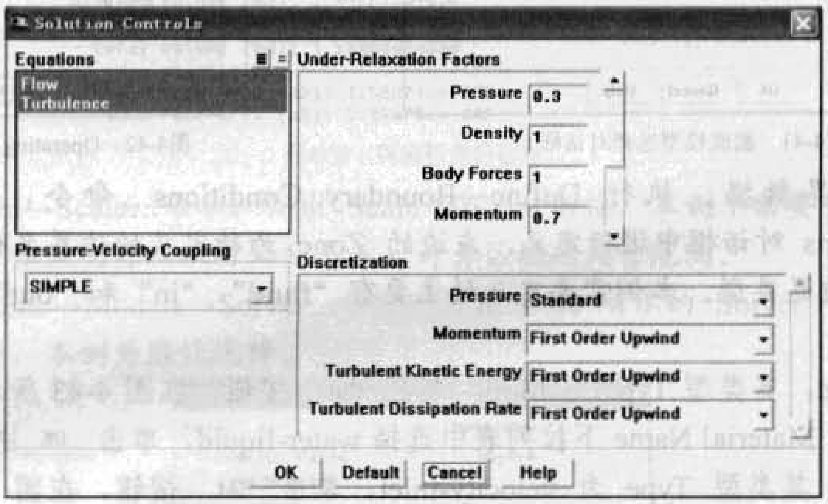


图4-46 Solution Controls 对话框

10. 接下来，对流场进行初始化。执行 Solve→Initialize→Initialize...命令，在弹出的如图 4-47 所示的 Solution Initialization 对话框中选择 in，顺序单击 Init 、Apply 、Close 按钮。

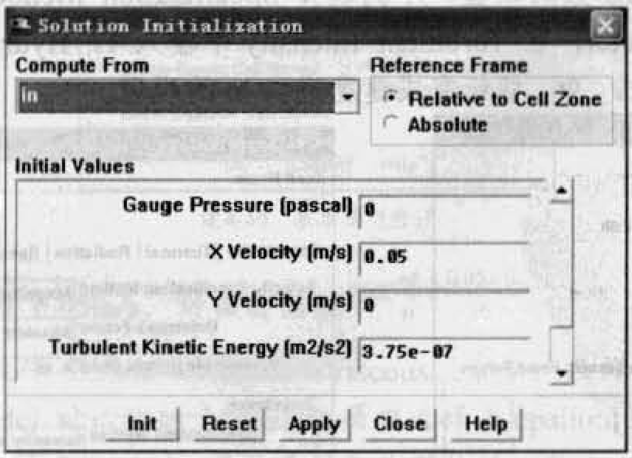


图4-47 Solution Initialization 对话框

11. 初始化后，执行 Solve→Monitors→Residual...命令，在弹出的 Residual Monitors 对话框中选中 Plot，以打开残差曲线图，FLUENT 默认的各参数的收敛精度为 0.001，本例为默认设置，如图 4-48 所示。

12. 完成上述步骤的设置后，执行 Solve→Iterate...命令，在弹出的如图 4-49 所示

的 Iterate 对话框中设置 Number of Iterations 为 500，单击 Iterate 按钮即可开始解算。

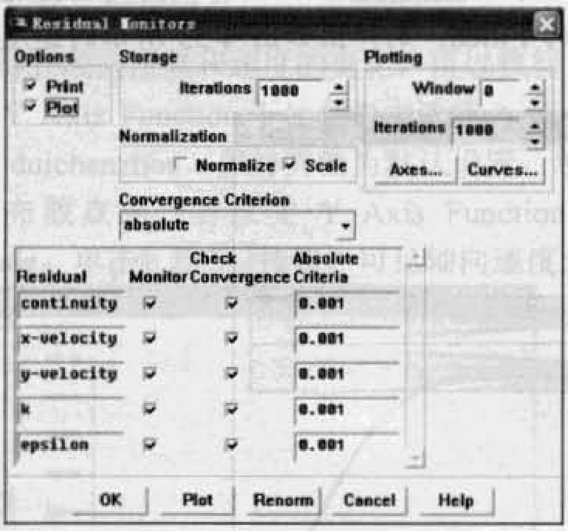


图4-48 Residual Monitors 对话框

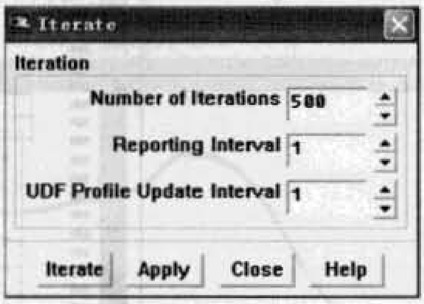


图4-49 Iterate 对话框

本例在计算到 350 步后，即达到了收敛，此时窗口中会出现“Solution is converged”的提示语句，其残差曲线如图 4-50 所示。

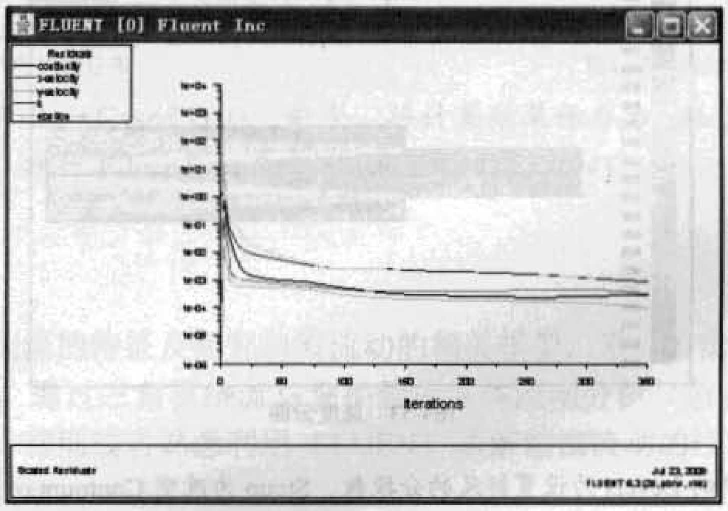


图4-50 残差曲线图

13. 计算完后，为显示整个轴向剖面，执行 Display→Views...命令，选中 Views 对话框中的 Mirror Planes 下方的 duichenzhou，如图 4-51 所示，单击 Apply 按钮后单击 Close 按钮关闭 Views 对话框。

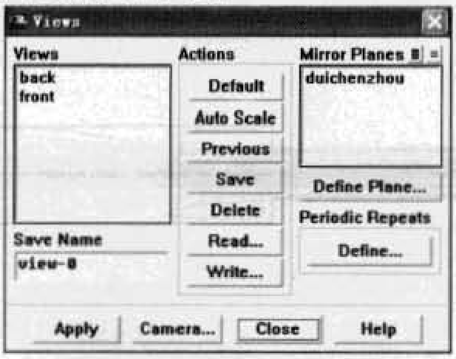


图4-51 Views 对话框

14. 下面将计算结果进行图形显示。执行 Display→Contours...命令，弹出 Contours

对话框，选择 Contours of 下拉列表中的 Velocity 和 Velocity Magnitude，并保持 Options 选择栏中的 Filled 未选中，单击 Display 按钮，图 4-52 所示为速度等值线图。若选中 Options 选择栏中的 Filled，则弹出如图 4-53 所示的速度云图。

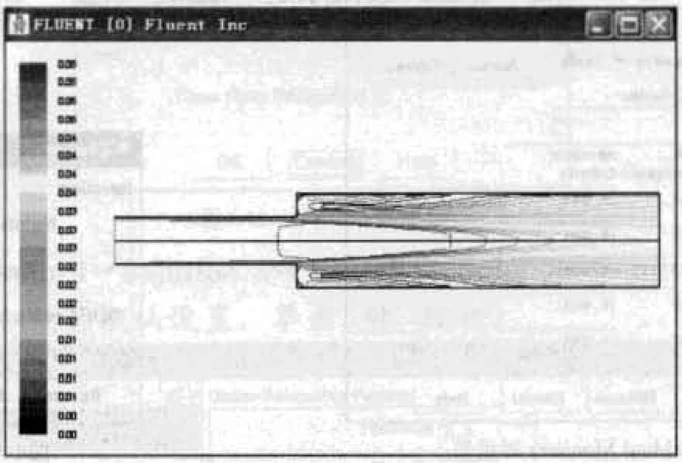


图4-52 速度等值线图

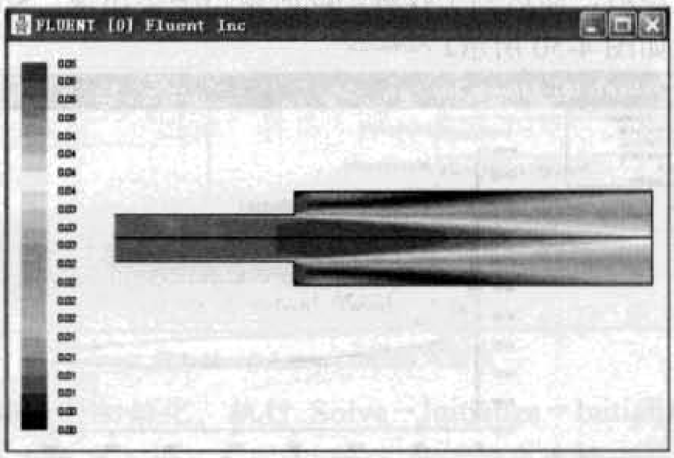


图4-53 速度云图

注意：Contours 对话框中的 Levels 为设置标尺的分段数，Steup 为改变 Contours of 的选项。

15. 再次单击 Contours of 下拉列表，选择 Velocity 和 Stream Function，而不选 Filled，单击 Display 按钮，可以查看流函数的等值线图，如图 4-54 所示。

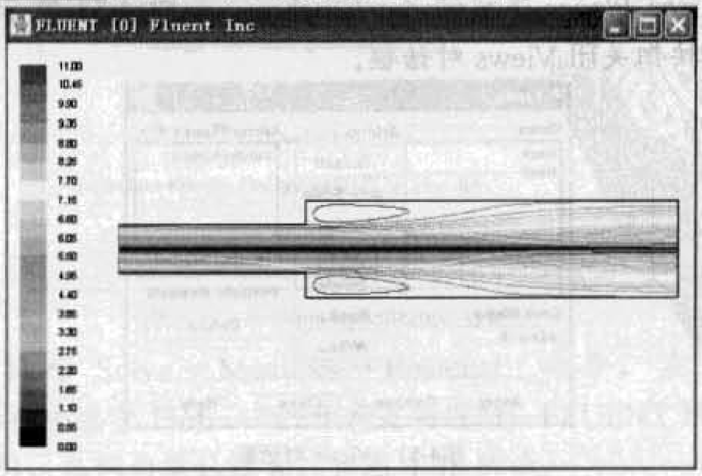


图4-54 流函数的等值线图

注意：Velocity 列表中除了 Velocity Magnitude 和 Stream Function 两个选项为常用之外，对于可压缩流，马赫数也在该列表中。

为得到轴向压强和速度的变化，可以执行 Plot→XY Plot...命令，在 Solution XY Plot 对话框的 Y Axis Function 下拉列表中选择 Pressure 和 Pressure Coefficient，并选择 Surfaces 列表中的 duichenzhou，保持其他为默认设置，单击 Plot 按钮，弹出如图 4-55 所示的轴向压强分布散点图。若改变 Y Axis Function 下拉列表中的选项为 Velocity 和 Velocity Magnitude，单击 Plot 按钮，可见轴向速度分布散点图，如图 4-56 所示。

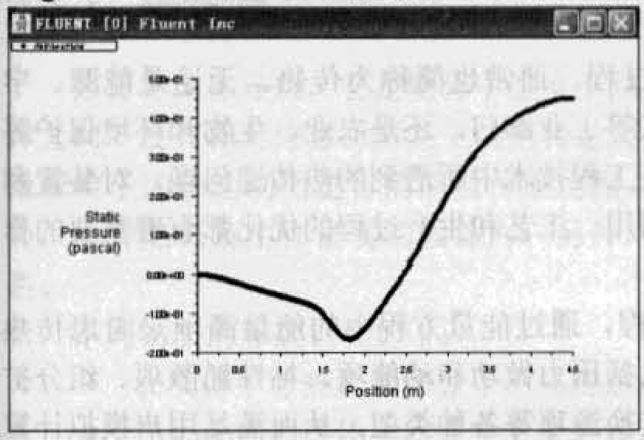


图4-55　轴向压强分布

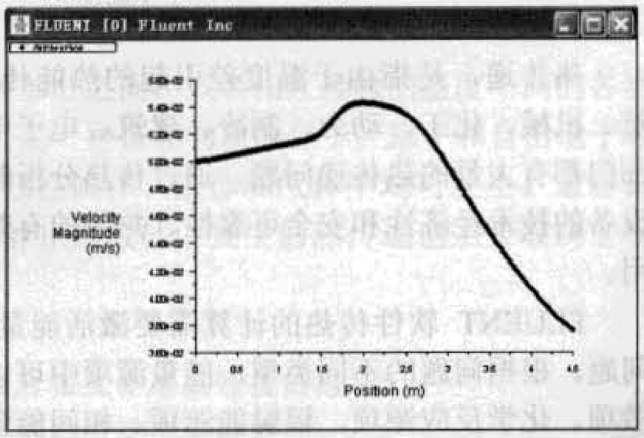


图4-56　轴向速度分布

16. 执行 File→Write→Case&Data...命令，将计算结果保存为 sl4-2.cas 和 sl4-2.dat 文件。最后，执行 File→Exit 命令，安全退出 FLUENT。

4.6 本章小结

本章主要讲述了湍流的特征及研究湍流流动的相关模型，重点给出了 FLUENT 中常用湍流模型的控制方程。通过三角翼绕流与突扩管内流体流动分析（前者为外流，后者为内流）两个实例的介绍，帮助读者熟悉利用 FLUENT 求解湍流流动的过程，以便用户结合工程实际问题分析湍流流动。

备忘录

- ➢ 湍流的概念及特征。
- ➢ 常用的湍流模型。
- ➢ 湍流计算的实际操作过程。

第5章 传热分析

热传递，是指由于温度差引起的热能传递过程，通常也简称为传热。无论是能源、宇航、机械、化工、动力、制冷、建筑、电子电工等工业部门，还是农业、生物和环境保护等部门都有大量的热传递问题。通过传热分析解决工程技术中所遇到的热传递问题，对装置和设备的技术经济性和安全可靠性、热能的有效利用、工艺和生产过程的优化都有着重要的作用。

FLUENT 软件传热的计算需要激活能量方程，通过能量方程中的能量源项来考虑传热问题。根据问题的不同类型，能量源项中可以包括压力做功和动能项、粘性耗散项、组分扩散项、化学反应源项、辐射能源项、相间能量交换源项等各种类型，从而满足用户模拟计算的需要。FLUENT 包含的传热模型，可以求解绝大部分工程所需解决的热传递问题，如汽车车厢内的热交换、空调房内的温度变化等实际应用问题。

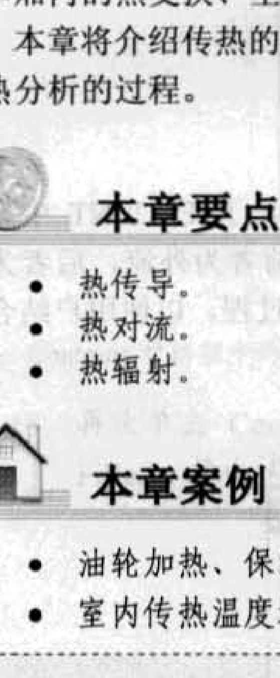
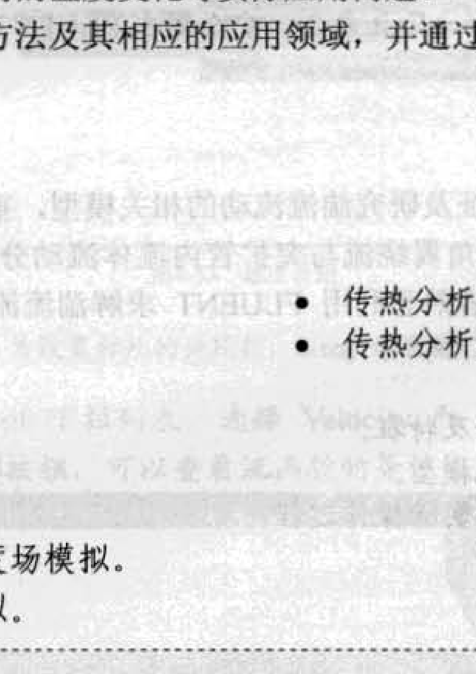
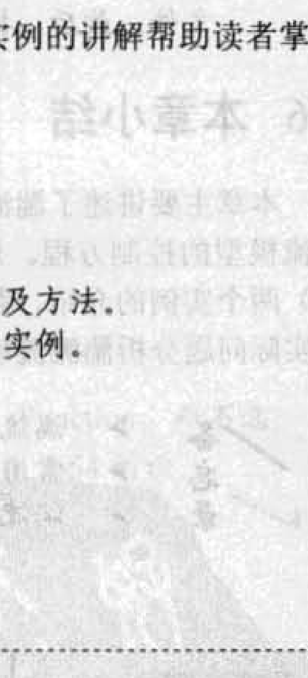
本章将介绍传热的各种方法及其相应的应用领域，并通过两个实例的讲解帮助读者掌握传热分析的过程。

本章要点

- 热传导。
- 热对流。
- 热辐射。
- 传热分析的应用及方法。
- 传热分析的操作实例。

本章案例

- 油轮加热、保温温度场模拟。
- 室内传热温度场模拟。

5.1 传热方法

热传递过程是一种复杂的物理现象，除了遵循热力学第一定律和第二定律外，还有其特殊的规律。通常，按其物理本质的不同，可以把它分为热传导、热对流和热辐射三种基本方式。在静止的液体中发生的热传递也主要取决于导热，而在流动的液体及流动或静止不流动的气体中热传递主要靠对流或热辐射。

5.1.1 热传导

热传导简称导热，它是物体中温度不同的各部分之间，或者相互接触的温度不同的各物体之间，没有相对位移时所发生的热传递现象，是一种依靠物质的分子、原子和自由电子等微观粒子的热运动而进行的能量传递过程。导热在固体、液体和气体中均可发生。通常认为：纯导热只发生在密实的固体内。另外，在静止的液体中发生的热传递也主要取决于导热。

不同物质的导热机理如下：

- 在气体中导热是气体分子不规则热运动时相互作用或碰撞的结果；
- 在不导电的固体中，导热主要是通过晶格的振动来实现的；
- 在金属中，导热主要是通过自由电子的运动、相互作用和碰撞来实现的；
- 液体中的导热，近代传热学的观点认为主要是依靠晶格振动和布朗运动实现的。

1822 年，法国数学家傅立叶对热传导现象作了深入的研究，提出了下面的数学式：

$$Q_\lambda = -\lambda A \frac{\partial T}{\partial n} \tag{5-1}$$

$$q_\lambda = \frac{Q_\lambda}{A} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \tag{5-2}$$

式中，Q_λ 为热流量（W），λ 为导热系数（W/(m·℃)），q_λ 为单位面积的热流量（W/m^2），T 为温度（℃），A 为面积（m^2）。

式（5-1）、（5-2）称为傅立叶定律，是热传导的基本定律，式中的负号表示热量传递的方向与温度梯度的方向相反。该式表明当物系进行纯导热时，单位时间内通过垂直于热流方向上的单位面积的热流量与温度梯度成正比。

导热系数 λ 是物质固有的一种热物理属性，其定义式由傅立叶定律式（5-2）给出：

$$\lambda = -\frac{q_\lambda}{\partial T / \partial n} \tag{5-3}$$

由式（5-3）可以看出，导热系数 λ 在数值上等于每单位温度梯度作用下物体所传导的热流密度值。λ 可用于表征物体导热性能的强弱，其值随物质的种类而异，且还与物质的结构、密度、湿度、温度、压力等因素有关。

- 气体的导热系数值约在 0.006～0.6W/(m·℃)范围内。随温度的升高而增大。在 10 个大气压力以下，大多数气体的导热系数仅仅是温度的函数，与压力无关。

- 液体的导热系数约在 0.07～0.7W/(m·℃)之间。液体中，除水和某些水溶液及甘油外，绝大多数液体的导热系数随温度的升高而减小，除非接近临界点，压力对液体导热系数无明显影响。

5.1.2 热对流

热对流是指温度不同的各流体微团发生宏观相对位移时引起的能量传递过程。简言之，是依靠流体的运动进行热量传递的现象。热对流只能发生在流动的流体中。

在工程技术领域中所遇到的传热问题，往往涉及到流体与固体壁直接接触时的换热。这种流动的流体与固体壁面之间的换热过程，称为对流换热。它的特点是，在贴近壁面处总有一层流体薄层存在，薄层中的热传递依靠导热进行，而在流体薄层外的热传递主要依靠对流进行。例如，电子元件的散热，冰箱排热管散热，暖气片的散热及冷库中冷却管的吸热等。

对流换热计算公式一直沿用牛顿冷却定律，表达式如下：

$$Q_\alpha = \alpha A\left(T_w - T_f\right) \tag{5-4}$$

$$q_\alpha = \alpha\left(T_w - T_f\right) \tag{5-5}$$

式中，Q_α 为单位时间内的对流换热量（W），q_α 为单位时间单位面积的对流换热量（W/m^2），T_w 为固体壁面温度（℃），T_f 为流体温度（℃），α 为对流换热系数（$W/(m^2·℃)$），A 为对流换热面积（m^2）。

需要注意的是，对流换热系数 α 与导热系数 λ 不同，α 不是物性参数，而是与流体运动产生的原因，流动的状态，流体有无相变，流体的物性以及壁面的形状、相对位置等许多因素有关的。

FLUENT 可以模拟因流体受热引发密度变化而产生重力差异导致的流体流动，这种流动称为自然对流的浮力驱动流动。

混合对流中，浮力影响可通过格拉晓夫数与雷诺数来判别：

$$\frac{Gr}{\mathrm{Re}^2} = \frac{g\beta\Delta TL}{V^2} \tag{5-6}$$

当此数值接近或超过 1.0 时，浮力对流动将有较大影响。相反，若此数较小，浮力的影响可以忽略。

在纯粹的自然对流中，浮力引起的流动强度由瑞利数决定：

$$Ra = \frac{g\beta\Delta TL^3\rho}{\mu\alpha} \tag{5-7}$$

若 $Ra<10^8$，浮力驱动的对流为层流；当 $10^8<Ra<10^{10}$ 时，对流为层流到湍流的过渡态；当 $Ra>10^{10}$ 时，对流为湍流流动。

当模拟封闭区域的自然对流时，密度场的计算是流场计算的关键。FLUENT 中有两种方法来计算密度场：

- 对于计算区域内温差较大的情况，将问题按非定常来计算；

- 对于小温差的情况，可以使用 Boussinesq 模型假设按定常问题来计算。

5.1.3 热辐射

热传导和热对流都必须通过物体的直接接触进行传热，然而，自然界中还存在着不依靠物体直接接触也能进行热传递的现象。物体通过电磁波的形式向外发射辐射能的现象叫做辐射。物体会因各种原因发出辐射能，其中由于温差或热的原因引起的辐射能量的传播过程称为热辐射。

自然界中各个物体都能不停地将其热能转化为辐射能向外发射，同时又不断地吸收来自其他物体的辐射能，并将其转变成热能储存起来。实验表明，物体的辐射能力和温度有关，同一温度下不同物体的辐射和吸收的本领也大不一样。高温物体发射的辐射能比吸收的多，低温物体吸收的多于高温物体的，结果形成辐射换热，总效果是使热量由高温物体传至低温物体。

当热辐射能量投射到物体表面上时，和可见光一样，也会发生吸收、反射和穿透现象。根据被吸收、反射和穿透的能量百分数可以定义该物体对投入辐射的吸收率、反射率和穿透率（三者和为 1）。吸收率为 1 的物体叫黑体，反射率为 1 的物体叫镜体，穿透率为 1 的物体叫做透明体。气体中分子结构对称的双原子气体（如氧气、氮气等）实际并无发射和吸收辐射的能力，可认为是热辐射的透明体。但是三原子（如 CO_2）、多原子（CH_4）以及结构不对称的双原子气体（如 CO）却有相当大的辐射本领。气体辐射不同于固体和液体辐射，具有两个突出的特点：

- 气体辐射对波长有选择性；
- 气体辐射和吸收是在整个容积中进行的。

辐射换热是高温条件下换热的主要机制。在相同温度下，黑体的辐射能力最大。它在单位时间内发射的辐射能可按斯蒂芬-玻尔兹曼定律计算：

$$Q = \sigma_b A T^4 \tag{5-8}$$

式中，Q 为辐射能量（W），T 为绝对温度（K（，A 为物质的表面积（m^2），σ_b 为黑体辐射常数，$\sigma_b=5.67\times10^{-8}W/(m^2 \cdot K^4)$。

实际物体的辐射能力均小于相同温度下黑体的辐射能力，其辐射能的计算式为：

$$Q = \varepsilon\sigma_b A T^4 \tag{5-9}$$

式中，ε 为物体的发射率，也称黑度。

对于两个互相平行且十分接近的黑体表面之间进行的辐射换热量可按下式计算：

$$Q = \sigma_b A\left(T_1^4 - T_2^4\right) \tag{5-10}$$

式中，T_1 为高温表面的绝对温度（K），T_2 为低温表面的绝对温度（K）。

可见，辐射换热与导热、对流换热不同，其特点是：

- 不仅有能量的传递，而且有能量形式的转换，即从热能转变为辐射能，或从辐射能转变为热能；
- 不必借助于中间介质，在真空中也能进行；
- 在发射辐射能的同时也在吸收。

FLUENT 中可以用 5 种模型来计算辐射换热问题，分别为离散换热辐射模型（DTRM）、P-1 辐射模型、Rosseland 辐射模型、表面辐射模型（S2S）和离散坐标辐射模型（DO）。

- 离散换热辐射模型（DTRM）是一个比较简单的模型，可以通过增加射线数量来提高计算精度，同时这个模型可以用于任何光学厚度。该模型假设所有表面都是漫射表面，即所有入射的辐射射线没有固定的反射角，而是均匀地反射到各个方向。计算中没有考虑辐射的散射效应，且假设辐射是灰体辐射。如果采用大量射线进行计算的话，会给 CPU 增加很大负担。DTRM 模型不能用于动网格或存在拼接网格界面的情况，也不能用于并行计算。
- P-1 辐射模型的辐射换热方程是一个计算量相对较小的扩散方程。在燃烧等光学厚度很大的计算问题中，P-1 辐射模型的计算效果较好。P-1 辐射模型还可以在采用曲线坐标系的情况下计算复杂几何形状的问题。然而，P-1 辐射模型也假设所有表面都是漫射表面，即所有入射的辐射射线没有固定的反射角，而是均匀地反射到各个方向。另外，该模型也是采用灰体假设。如果光学厚度较小时，计算精度会受到几何复杂程度的影响。
- Rosseland 辐射模型不用像 P-1 辐射模型那样计算额外的输运方程，因此该模型的计算速度较快，需要的内存较少。但是该模型只能用于光学厚度大于 3 的问题，同时计算中只能采用压力基求解器进行计算。
- 表面辐射模型（S2S）用于计算在没有参与性介质的封闭空间内的辐射换热计算，如飞船散热系统、太阳能集热器和汽车机箱内的冷却过程等。虽然 S2S 模型视角因子的计算需要占用较多的 CPU 时间，但其每个迭代步计算速度很快。与 DTRM 和 P-1 模型一样，S2S 模型也假设所有表面都是漫射表面，并采用灰体辐射模型进行计算。S2S 模型不能计算有参与性辐射介质的问题，不能用于带周期性边界条件或对称边界条件的计算，不能用于二维轴对称问题的计算。也不能用于多种封闭区域的辐射计算，只能用于单一封闭几何形状的计算。另外，S2S 模型也不适用于拼接网格界面、悬挂节点存在的情况和网格的自适应计算。
- 离散坐标辐射模型（DO）是使用范围最大的模型，它可以计算所有光学厚度的辐射问题，并且计算范围涵盖了从表面辐射、半透明介质辐射到燃烧问题中出现的参与性介质辐射在内的各种辐射问题。DO 模型采用灰带模型进行计算，因此既可以计算灰体辐射，也可以计算非灰体辐射。如果网格划分不是特别细时，计算所占用的 CPU 时间并不长，所以，DO 模型成为计算中经常使用的一个模型。

选择辐射模型的标准主要有如下内容。

- 光学厚度。光学厚度远大于 1 时，最好选用 P-1 和 Rosseland 模型；光学模型大于 3 时，选用 Rosseland 模型；对于更高的光学厚度，推荐使用 DO 模型和二阶离散格式；DTRM 和 DO 模型对任何光学厚度都适用；对于光学厚度小于 1 的问题，则只能使用 DTRM 和 DO 模型。
- 散射率和发射率。P-1、Rosseland 和 DO 模型均可以计算散射问题，而 DTRM

模型则忽略了散射的影响。

- 颗粒效应。只能使用 P-1 和 DO 模型计算气体与颗粒间的辐射换热。
- 半透明介质与镜面边界。只能使用 DO 模型。
- 非灰体辐射。只能使用 DO 模型。
- 局部热源问题。推荐使用 DO 模型，如果采用足够多的射线数目，还可以采用 DTRM 模型。
- 封闭腔内没有参与性辐射介质的情况。S2S 模型最为适用。
- 外部辐射问题。如果要考虑计算区域外部的辐射影响，那么，在模型边界定义时要使用外部辐射边界条件。如果不关心计算区域内部的辐射，仅考虑外部辐射的影响，只需要用户在边界定义的时候使用外部辐射边界条件即可。

5.2 传热分析的应用及方法

FLUENT 软件可以模拟绝大部分工程所需解决的热传递问题。

- 浸泡问题。
- 润滑问题。
- 换热器的结构优化与应用。
- 火焰辐射问题。
- 采暖、通风和空调工业中的空间传热问题。
- 汽车工业中车厢的传热分析。
- 玻璃加工、玻璃纤维拉拔和陶瓷加工过程中的辐射。
- 钻井工程中深井的井温分布问题。
- 固井时水泥浆在井内所处的温度场问题。
- 原油管道的加热输送及停输温降问题。
- 油轮加热、保温问题。
- 表面辐射加热或冷却问题。
- 辐射、对流和热传导的耦合传热问题。
- 气体与颗粒之间的辐射换热问题。
- 飞船散热系统传热问题。
- 太阳能集热器传热问题。

用户利用 FLUENT 求解传热问题时需要进行如下设置。

- 激活传热计算模型，即执行 Define→Models→Energy 命令，打开 Energy 对话框上的 Energy Equation 选项来激活传热计算，如图 5-1 所示。若考虑粘性加热作用时，如润滑问题及高速、压缩流动时，需要执行 Define→Models→Viscous 命令，在 Viscous Model 对话框中激活 Viscous Heating 选项，如图 5-2 所示。

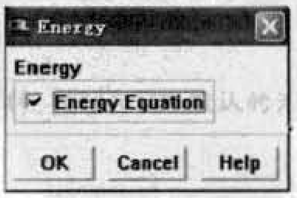


图5-1 激活能量方程

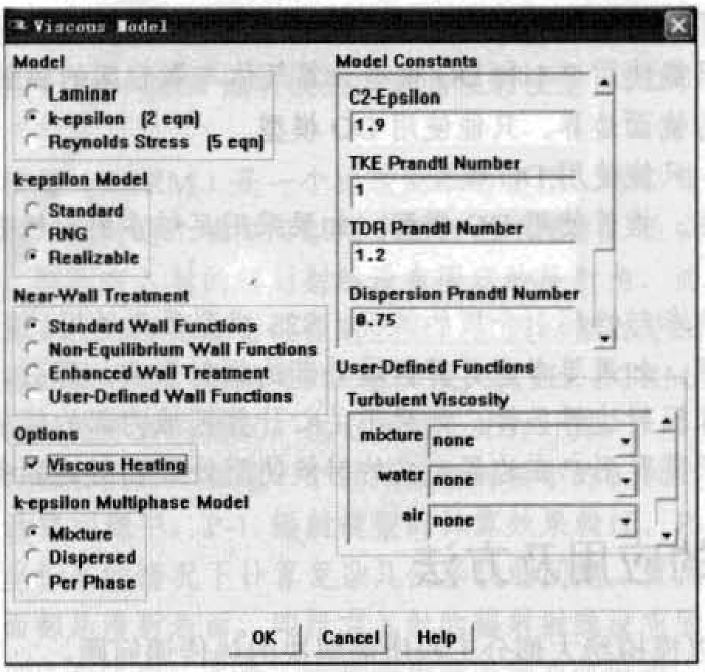


图5-2　激活粘性加热选项

- 设置流动入口、出口及壁面上的热边界条件。执行 Define → Boundary Conditions 命令，设置流动入口、出口的温度和壁面的热边界。图 5-3 所示的速度入口与图 5-4 所示的压力出口的温度设置，用户只需在入口（Velocity Inlet 或 Pressure Inlet）、出口（Pressure Outlet）边界条件设置对话框的 Thermal 选项中的 Temperature[K]中进行设置。FLUENT 默认进、出口边界上的温度均为 300K。FLUENT 提供的壁面热边界类型有 5 个，有热流边界条件、温度边界条件、对流换热边界条件、辐射边界条件以及辐射和对流混合边界条件，如图 5-5 所示。FLUENT 默认在壁面上使用零热流（绝热）边界条件。

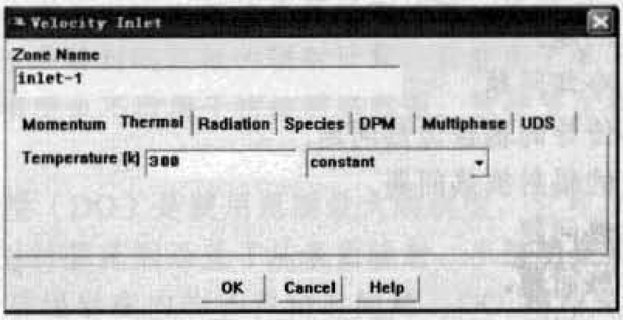


图5-3　速度入口边界温度设置

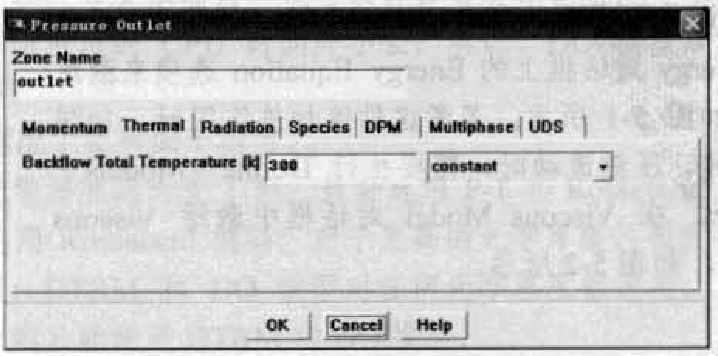


图5-4　压力出口边界温度设置

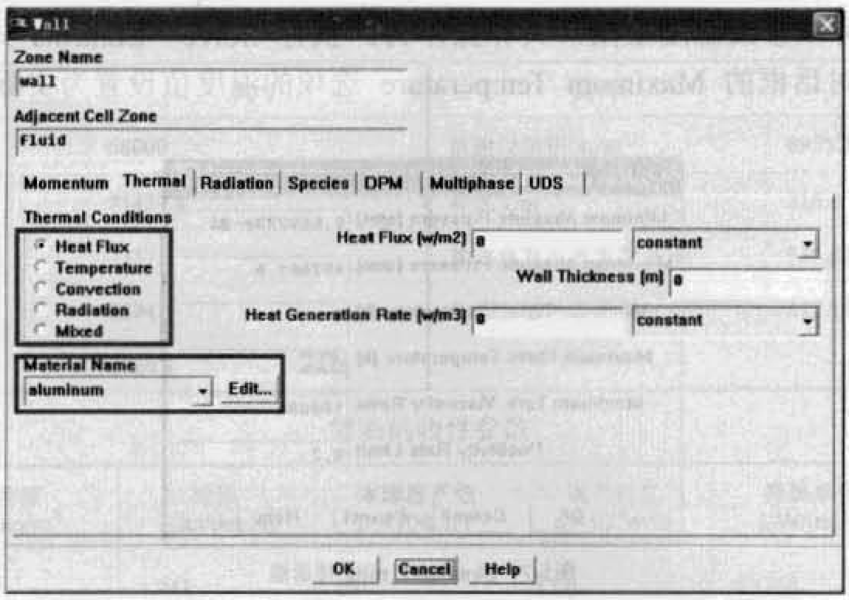


图5-5　壁面热边界条件设置

- 传热问题中介质参数的设定。执行 Define→Materials 命令，设置流体和壁面物质的比热和导热系数。FLUENT 允许用户调用自定义函数（UDF）来设置物质的热物理参数，如图 5-6 所示。

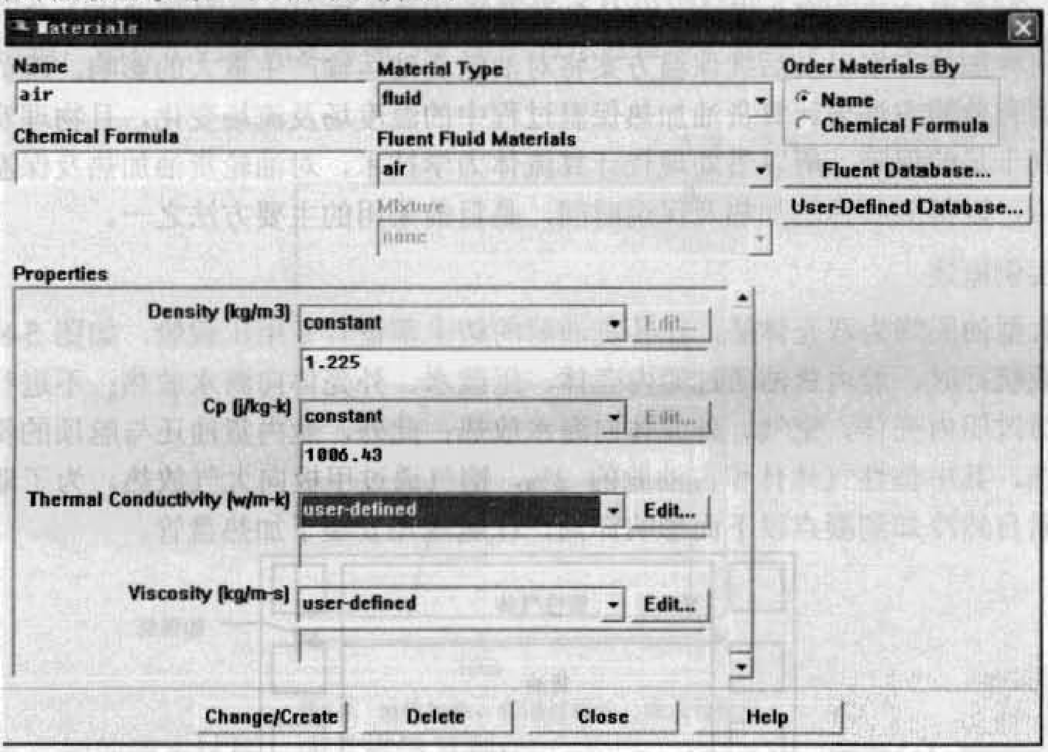


图5-6　材料热物理参数设置

注意：壁面热边界条件设置对话框中的 Material Name 下拉列表可以设置壁面的材料，FLUENT 默认的为 aluminum。

出于计算稳定性的考虑，FLUENT 对计算过程中的温度范围进行了限制，上限为 5000K，下限为 1K。进行温度的限制主要是为了保证传热计算的真实性，因为根据物理特性，现实中的温度应该处于这样的一个范围内。如果在计算的过程中，温度超出了上限，则将温度遏制于 5000K，若温度低于下限，则遏制于 1K。若实际传热问题的温度确实超过

5000K，则用户可以修改温度上限。具体操作为，执行 Solve→Controls→Limits 命令，将 Sloution Limits 对话框的 Maximum Temperature 选项的温度值设置为实际需要的温度上限值，如图 5-7 所示。

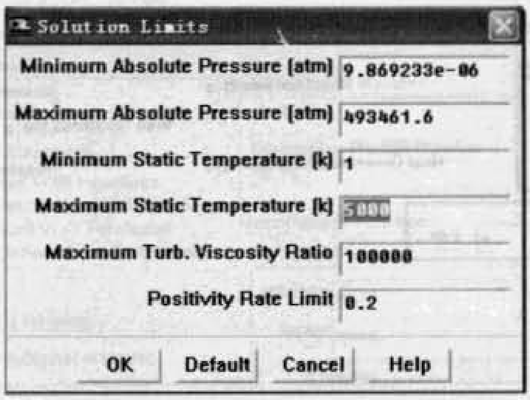


图5-7 Sloution Limits 对话框

下面通过两个工程实例，介绍 FLUENT 传热分析的过程。

【实例 5-1】：油轮加热、保温温度场模拟

油轮在航行的过程中，根据不同的航线、航程，舱内货油将会受到诸多因素影响而发生自然冷却，如果温度降到凝点温度，将给卸货带来困难。所以在这种情况下必须对其进行加热，采用何种加热方案以及后续保温方案将对油轮货油运输产生重大的影响。现尚未有一种特别方便而有效的方法来计算货油加热保温过程中的温度场及流场变化，且物理实验的精度也无法得到十足的保障。所以借助现代计算流体力学技术，对油轮货油加热及保温时的温度场进行模拟，以得到具体的加热及保温时间，是目前采用的主要方法之一。

一、实例概述

现代大型油船均为双壳体船，在各货油舱的边上都设有专用压载舱，如图 5-8 所示。当船舶在压载航行时，舱内货油通过船内壳体、压载水、外壳体向海水放热；不进行压载时，舱内货油通过船内壳体、空气、外壳体向海水放热；此外，舱内货油还与舱顶的惰性气体发生对流换热，其中惰性气体体积占油舱的 2%，惰气通过甲板向大气放热。为了避免油温由于上述因素自然冷却到凝点以下而影响卸油，在舱底还安装了加热盘管。

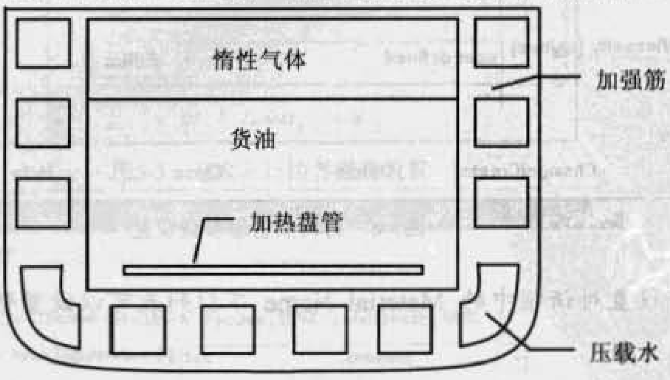


图5-8 油轮货舱横截面示意图

本例针对运送 ARDJUNA Crude Oil 货油的 68000DWT 型油轮进行加热、保温温度场模拟，其油轮结构参数和货油物性参数分别如表 5-1 和表 5-2 所示，并假设初始油温为 51℃，海水温度为 20℃，大气温度为 25℃。

表5-1　　　　油轮的结构参数

结构	尺寸	结构	尺寸
油舱容积 V/m^3	68000	油舱顶面积 A_d/m^2	6955.2
油舱内侧面积 A_{wn}/m^2	71429.4	船长 l/m	216.0
油舱外侧面积 A_{wo}/m^2	7357.0	加热盘管内表面积 A_i/m^2	536.57
油舱内底面积 A_{wn1}/m^2	8394.4	加热盘管外表面积 A_o/m^2	612.14
油舱外底面积 A_{wo2}/m^2	6026.4		

表5-2　　　　货油的物性参数

油品名称	密度 $\rho_0$kg/m^3	比热 c_0kJ/(kg·K)	体膨胀系数 β_0×106 1/T	运动粘度 υ_0×10^{-6}m^2/s	导热系数 λ_0W/(m·K)	普朗特数 Pr_0
ARDJUNA CRUDE OIL	838.8	1.941	891	17.0	0.1360	203.5

思路分析

若本例假设把所有油舱当作一个整体，忽略油舱内货油的热阻及货油与油轮内壳体的对流换热热阻，另外，货油热力学参数变化取温度变化范围内的平均值，外界的大气和海水取实测的平均值，则可把问题简化为图 5-9 所示的几何模型，相当于一个封闭方腔内的传热问题。

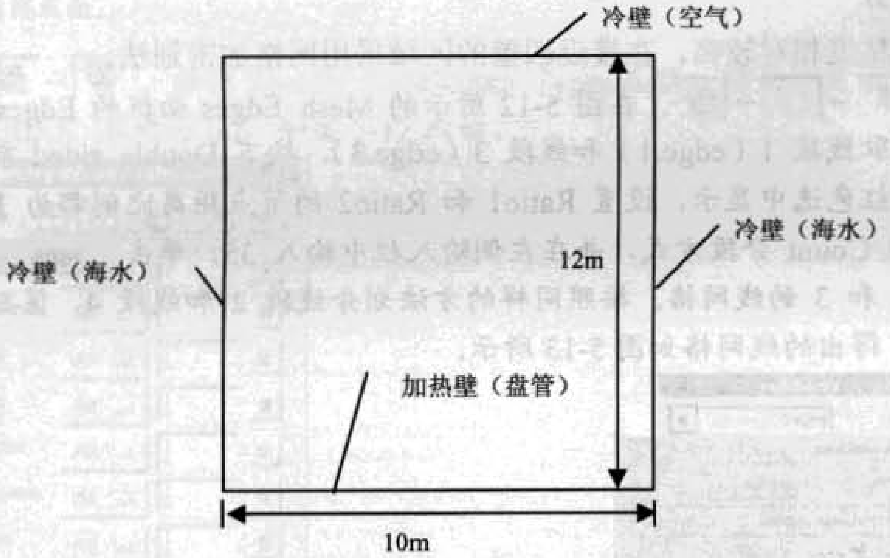


图5-9　油轮加热、保温过程的二维几何模型

通过本实例的演示过程，读者将学习到：

- 热边界定义；
- 自定义材料的定义；
- 非定常的计算；
- 时间步长的设置；
- Boussinesq 模型假设。

结果文件——参见附带光盘“Ch5\sl5-1.msh”、“Ch5\sl5-1.dbs”、“Ch5\sl5-1.jou”、

"Ch5\sl5-1.trn"、"Ch5\sl5-1-j.cas"、"Ch5\sl5-1-j1h.dat"、"Ch5\sl5-1-j5h.dat"、"Ch5\sl5-1-j10h.dat"、"Ch5\sl5-1-j20h.dat"、"Ch5\sl5-1-j30h.dat"、"Ch5\sl5-1-j40h.dat"、"Ch5\sl5-1-b.cas"、"Ch5\sl5-1-b1h.dat"、"Ch5\sl5-1-b10h.dat"、"Ch5\sl5-1-b50h.dat"、"Ch5\sl5-1-b100h.dat"、"Ch5\sl5-1-b150h.dat"。

动画演示——参见附带光盘"Ch5\AVI\sl5-1.avi"。

二、模型建立

本例模型相对简单，只需启动 GAMBIT 软件，直接执行面建立命令。具体操作为：单击 → → ，在 Create Real Rectangular Face 面板的 Width 和 Height 中分别输入 10 和 12，如图 5-10 所示。单击 Apply 按钮，即生成了图 5-11 所示的几何模型。



图5-10 矩形生成面板

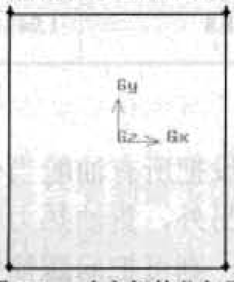


图5-11 建立好的几何面

三、网格划分

考虑到货油粘度相对较高，在接近四壁的区域采用网格加密划法。

1. 单击 → → ，在图 5-12 所示的 Mesh Edges 面板的 Edges 黄色输入栏中选取线段 1（edge.1）和线段 3（edge.3），按下 Double sided 前面的按钮使其呈红色选中显示，设置 Ratio1 和 Ratio2 的节点距离比例都为 1.05，选择 Interval Count 分段方式，并在左侧输入栏中输入 35，单击 Apply 按钮生成线段 1 和 3 的线网格。按照同样的方法划分线段 2 和线段 4，区别在于分成 40 段，得出的线网格如图 5-13 所示。

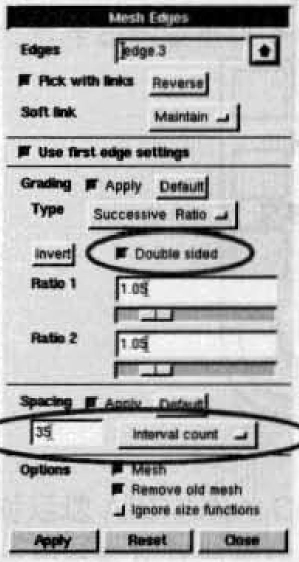


图5-12 线网格划分

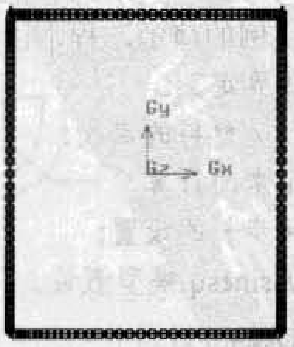


图5-13 划分好的线网格

2. 单击 → → ，打开 Mesh Faces 面板，用 Shift+鼠标左键选中已经完

成线网格划分的几何面，运用 Quad 单元与 Map 方法对这该面进行面网格划分，保留其他默认设置，单击键入生成如图 5-14 所示的网格。

3. 单击 → ，在 Specify Boundary Types 面板中将边壁 4 条线均定义为壁面（WALL）边界，名称分别为 top、bottom、wallleft 和 wallright，如图 5-15 所示。

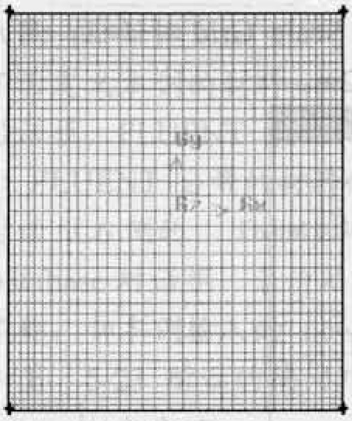


图5-14　生成好的面网格

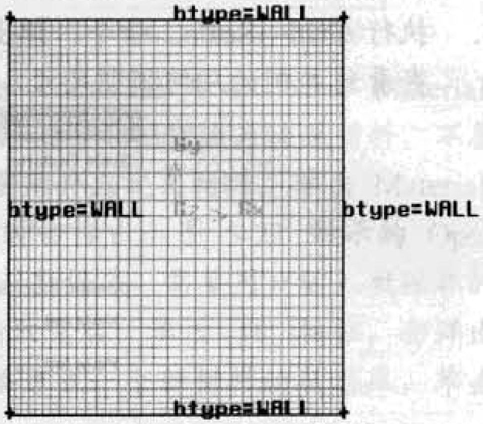


图5-15　边界类型定义

4. 单击视图控制面板中的按钮，在弹出的如图 5-16 所示的 Specify Display Attributes 面板中将下方 Mesh 后面的 Off 选中，关闭视图窗口中的网格显示。

注意：对于较复杂的几何图形，用户在定义边界类型之前，可以将网格暂时关闭，以便定义时能够正确选中所需要的线或面。

5. 单击 → ，弹出 Specify Continuum Types 面板，将面 1 定义为流体区域（FLUID），名称为 oil，如图 5-17 所示。

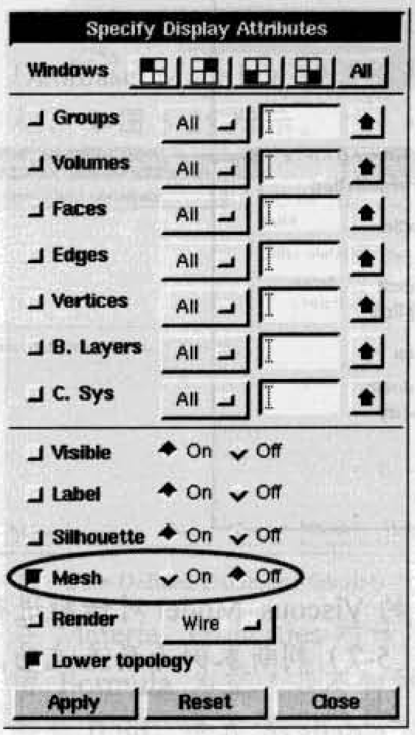


图5-16　关闭网格显示

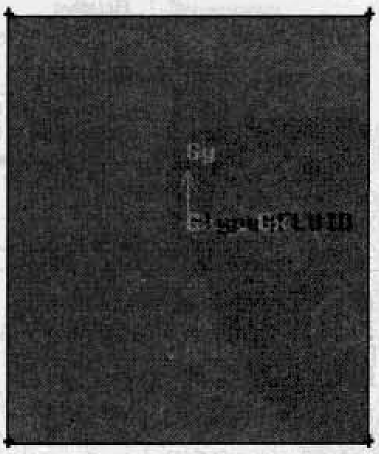


图5-17　介质类型定义

6. 网格划分完后，执行 File→Export→Mesh 命令，将网格输出为 sl5-1.msh。

四、求解计算

1. 启动 FLUENT（2d 计算器），执行 File→Read→Case...命令，读入划分好的网格文件“sl5-1.msh”。
2. 执行 Grid→Check 命令，对网格进行检测，待窗口界面中最后一行出现“Done”语句时表示检测成功。
3. 执行 Grid→Scale...命令，弹出如图 5-18 所示的 Scale Grid 对话框，用户可以查看到本例的几何模型尺寸，长为 10m，高为 12m。

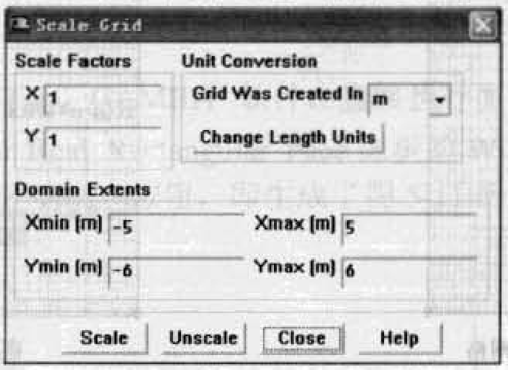


图5-18 Scale Grid 对话框

4. 执行 Define→Models→Solver...命令，弹出如图 5-19 所示的 Solver 对话框。本例为非定常模型，故选取 Time 下的 Unsteady，其余保持默认，单击 OK 按钮。

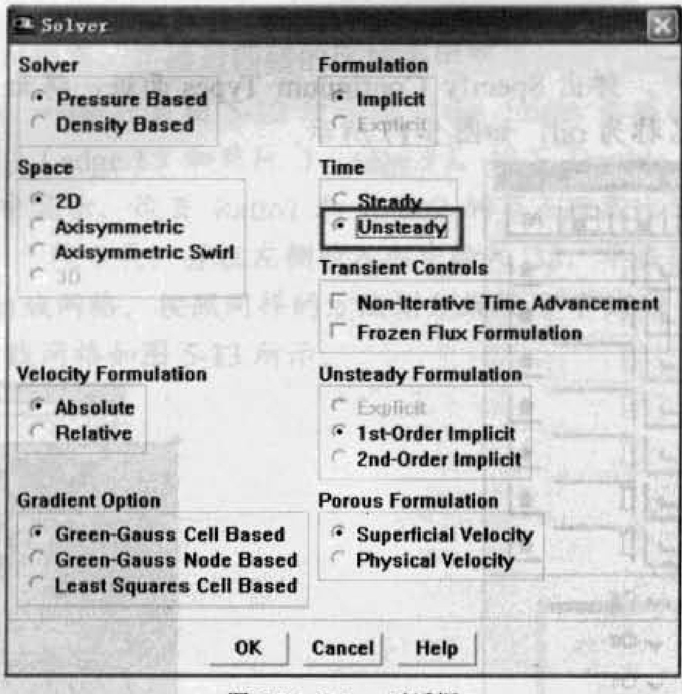


图5-19 Solver 对话框

5. 执行 Define→Models→Viscous...命令，在弹出的 Viscous Model 对话框进行层或湍流模型的设置，如图 5-20 所示。通过式（5-7）判断本例为层流流动，故保持 FLUENT 默认的层流模型，直接单击 OK 按钮。
6. 执行 Define→Models→Energy 命令，勾选 Energy 对话框上的 Energy Equation 选项，以激活传热计算，如图 5-21 所示。

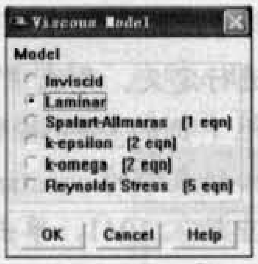


图5-20 Viscous Model 对话框

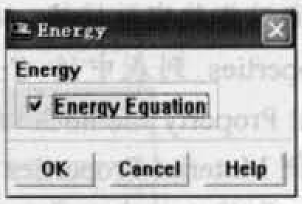


图5-21 Energy 对话框

7. 下面定义本例的材料——货油。执行 Define→Materials 命令，弹出 Materials 对话框。FLUENT 默认的材料为空气（air），由于本例货油为特殊材料，不属于 FLUENT 自带的材料数据库之列，故需要用户自定义材料。单击 Materials 对话框右侧的 Fluent Database... 按钮，此时会弹出如图 5-22 所示的 Open Database 对话框，若为第一次定义自定义材料数据库，需要用户输入数据库的名称，如本例输入的 new materials。名称输入完后，单击 OK 按钮，会弹出如图 5-23 所示的询问对话框，意为是否要建立一个新材料的数据库，单击 Yes 按钮即可。

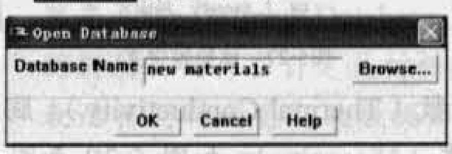


图5-22 Open Database 对话框

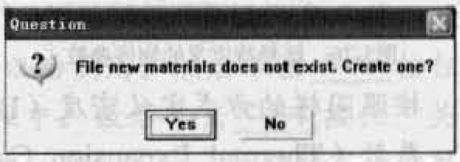


图5-23 建立新材料数据库询问框

8. 至此，已经建立一个空白的自定义材料数据库。单击完 Yes 按钮后弹出如图 5-24 所示的 User-Defined Database Materials 对话框，对话框中的 User-Defined Fluid Materials 列表为全空，表示尚未定义任何新材料。
9. 现在建立新材料数据库里的第一个材料——货油。单击 User-Defined Database Materials 对话框最下方的 New... 按钮，弹出 Material Properties 对话框，如图 5-25 所示。

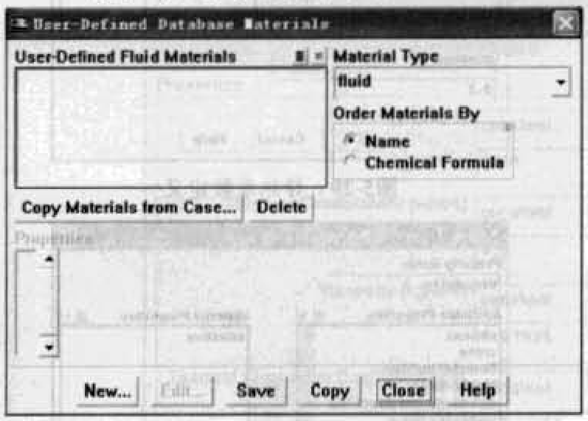


图5-24 User-Defined Database Materials 对话框

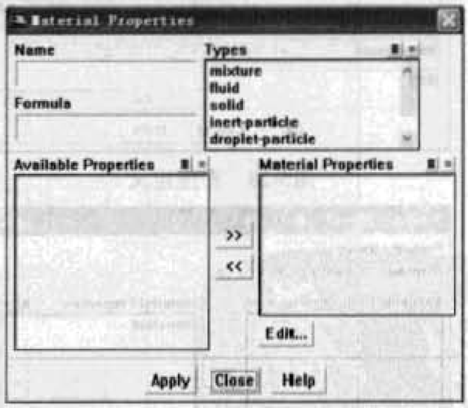


图5-25 Material Properties 对话框

10. 在 Material Properties 对话框的 Name 栏输入货油的名称 ardjuna-crude-oil，保留 Formula 为空（若不知材料的分子式，可以保留为空），然后选择 Types 类型为 fluid，并在 Available Properties 列表中选择比热容（Cp[Specific Heat]）、密度（Density）、导热系数（Thermal Conductivity）、膨胀系数（Thermal Expansion Coefficient）、粘度（Viscosity），移到右侧 Material Properties 列表

中，如图 5-26 所示。

11. 下面对比热容、密度、导热系数、膨胀系数和粘度进行定义。先选中 Material Properties 列表中的 Cp[Specific Heat]，单击对话框下侧的 Edit... 按钮，弹出 Edit Property Methods 对话框。将 Available Properties 列表中的 constant 移入到右侧 Material Properties 列表中，并在左下方输入栏中输入 1941，单击 OK 按钮，即将比热容以常数形式定义为 1941J/（kg·K），如图 5-27 所示。

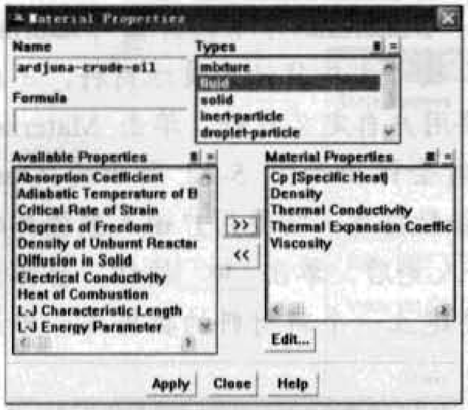


图5-26 选择待定义的物性参数

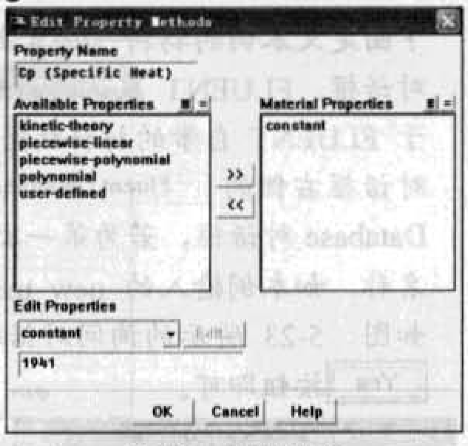


图5-27 比热容定义

12. 按照同样的方式定义密度（Density）、导热系数（Thermal Conductivity）、膨胀系数（Thermal Expansion Coefficient）和粘度（Viscosity），如图 5-28 至图 5-31 所示，其中定义粘度时选择 Available Properties 列表中的 boussinesq。

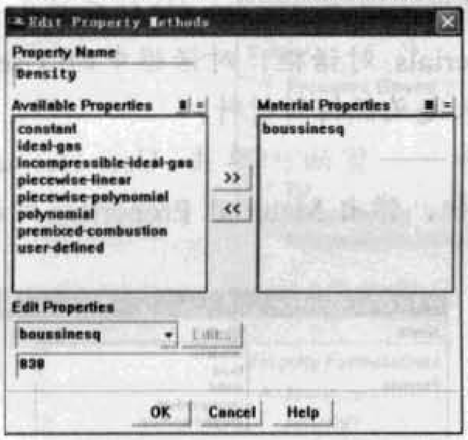


图5-28 密度定义

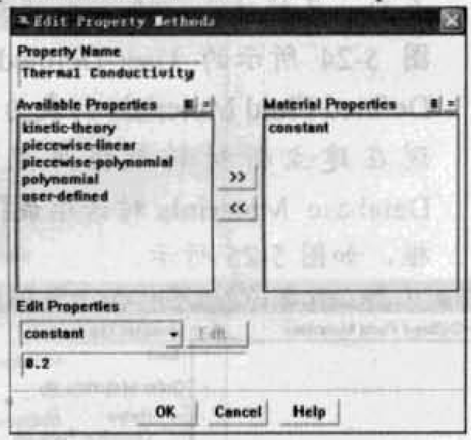


图5-29 导热系数定义

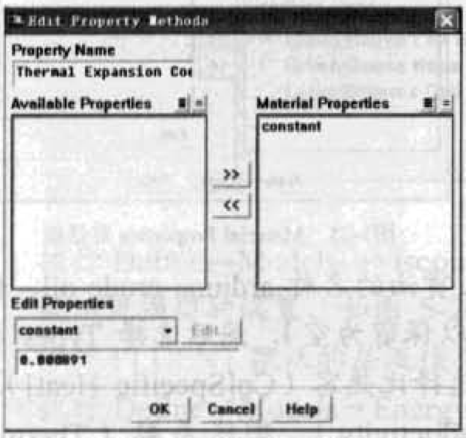


图5-30 膨胀系数定义

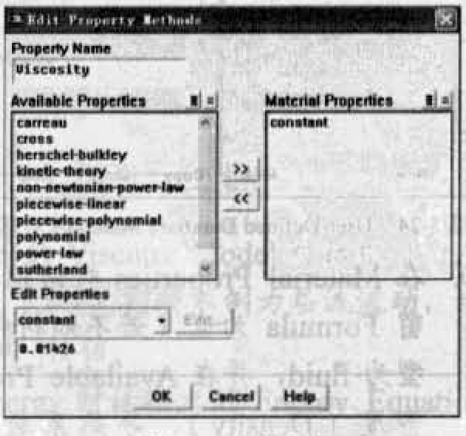


图5-31 粘度定义

13. 所有物性参数的数值定义完后，回到 Material Properties 对话框，单击 Apply 、Close 按钮。此时，User-Defined Database Materials 对话框中就已经有了新材料 ardjuna-crude-oil 了，如图 5-32 所示。

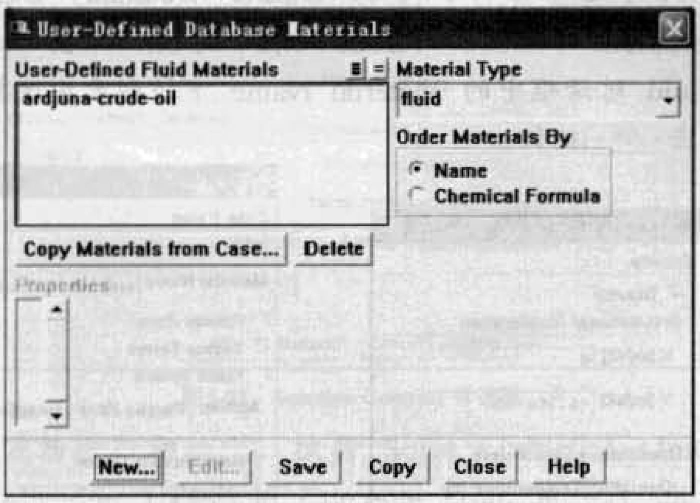


图5-32 新材料已存在于自定义数据库中

14. 单击 User-Defined Database Materials 对话框下侧的 Save 按钮，表示将定义好的新材料储存在自定义材料数据库中，以便以后调用。然后单击 Copy 按钮，表示将材料由自定义数据库拷贝到当前工程中。最后单击 Close 按钮，关闭 User-Defined Database Materials 对话框。至此，我们完成了新材料定义的整个过程。

15. 回到最初的 Materials 对话框，此时 ardjuna-crude-oil 已出现在工程材料中，如图 5-33 所示，单击 Close 按钮，关闭 Materials 对话框。

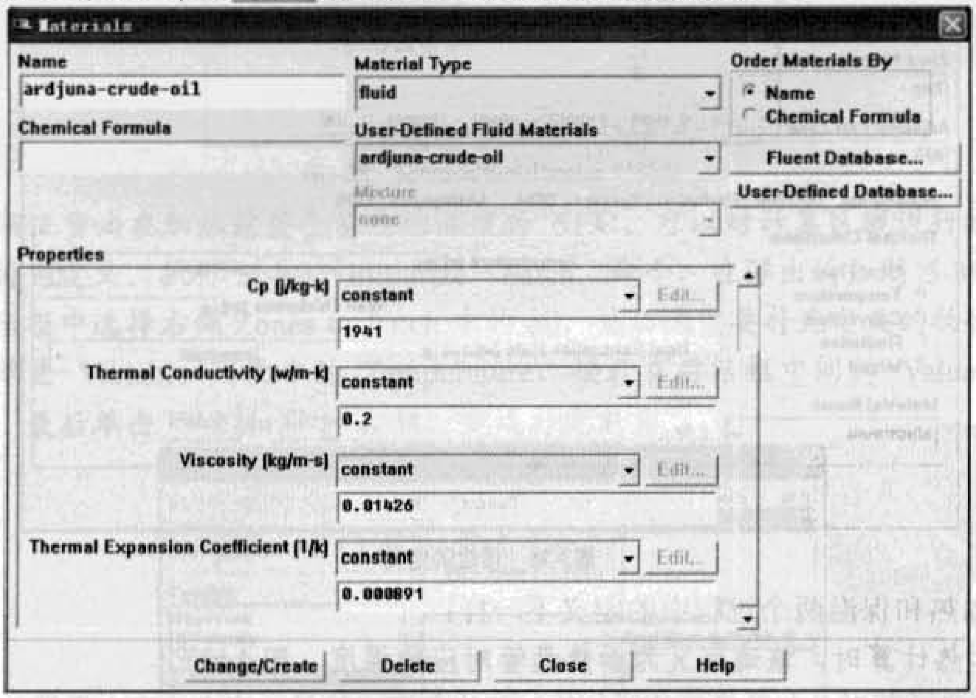


图5-33 Materials 对话框

16. 执行 Define→Operating Conditions 命令，在图 5-34 所示的 Operating Conditions 对话框中设置本例的操作环境。保持左侧的环境压强为 1 个大气压（101325Pa）及参考位置为原点（0，0），选中右侧的 Gravity，设置 y 方向的

加速度为-6.15×10^{-5}，在 Boussinesq Parameters 下方的操作温度输入栏中输入 100（℃），单击 OK 按钮。

17. 下面定义本例的边界条件，单击 Define→Boundary Conditions…，选择 Boundary Conditions 对话框左侧 Zone 列表中的 oil，单击 Set... 按钮，在图 5-35 所示的 Fluid 对话框中的 Material Name 下拉列表中选择新材料 ardjuna-crude-oil，单击 OK 按钮。

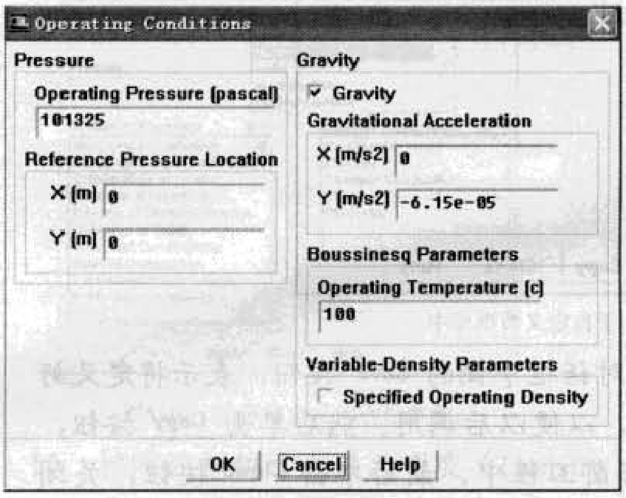


图5-34 操作环境设定

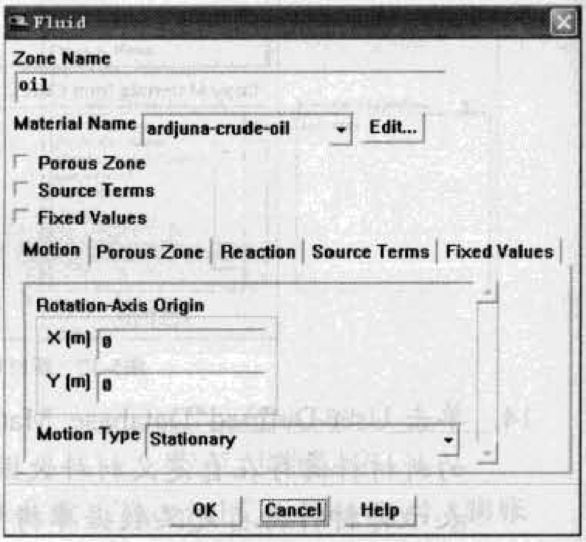


图5-35 流动介质定义

18. 接着依次选择 Zone 列表中 top、wallleft、wallright，单击 Set... 按钮，在 Wall 对话框中选择 Thermal Conditions 下方的 Temperature，设定温度值分别为 25、20 和 20，表示将这 3 条边定义为恒温边界，图 5-36 所示为顶边的定义。

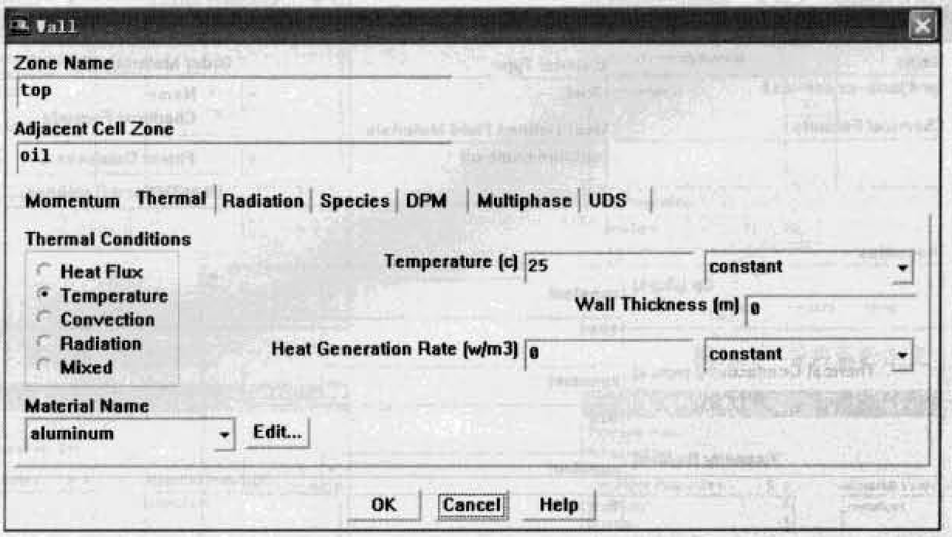


图5-36 顶边的定义

底边在加热和保温两个过程中的定义不一样：

- 在加热计算时，该边定义为加热盘管对应的温度，即 140℃；
- 在保温计算时，加热盘管已不加热，该边与海水接触，定义为海水温度 20℃。

19. 执行 Solve→Control→Solution…命令，弹出如图 5-37 所示的 Solution Controls 对话框，选择 Discretization 下方 Pressure 的格式为 PRESTO!，其余保持默认，单击 OK 按钮。

注意：初始化中的 Patch 能够完成区域内各物性参数——压强、组分、温度等的补充定义，加快运算速度。

22. 初始化后，执行 Solve→Monitors→Residual...命令，在弹出的 Residual Monitors 对话框选中 Plot，以打开残差曲线图，FLUENT 默认的 continuity、x-velocity、y-velocity 的收敛精度为 0.001，默认的 energy 的收敛精度为 10^{-6}，本例为默认设置，如图 5-40 所示。

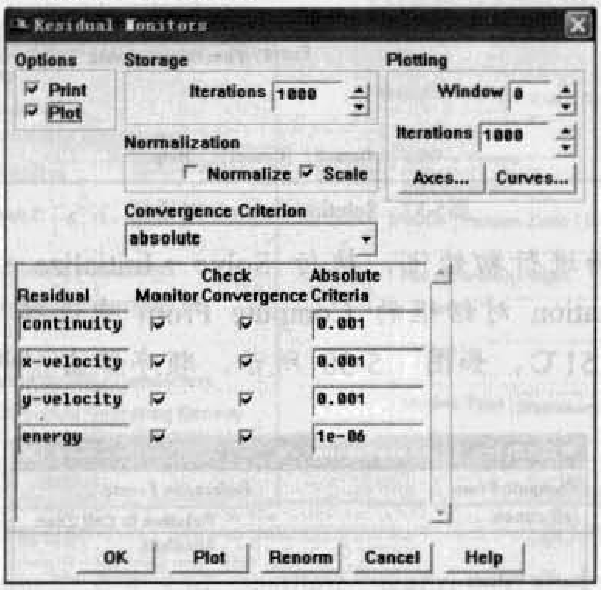


图5-40 Residual Monitors 对话框

23. 执行 File→Write→Case...命令，将工程文件保存为 sl5-1-j.cas。

下面设置完迭代步数后就可以开始计算了。

24. 加热计算。

(1) 执行 Solve→Iterate...命令，弹出如图 5-41 所示的 Iterate 对话框，其中的 Time Step Size 为时间步长，设置为 0.1s，Number of Time Steps 为时间步数，先设置为 36000，即迭代时间为 1h，单击 Iterate 按钮开始解算。

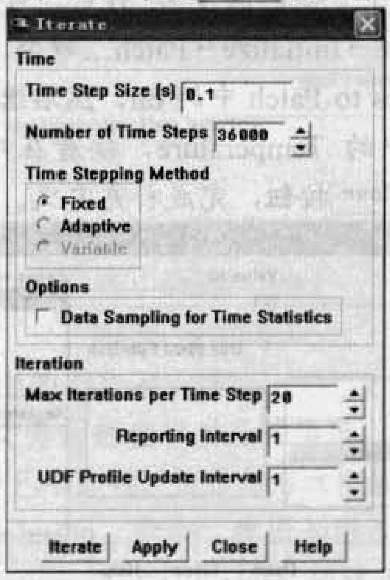


图5-41 Iterate 对话框

注意：时间步长选取应根据实际问题尽可能选小一些，以确保精确度。

(2) 迭代 1h 后，执行 File→Write→Data…命令，将加热 1h 的结果文件保存为 sl5-1-j1h.dat。

(3) 执行 Display→Contours…命令，在图 5-42 所示的 Contours 对话框中选择 Contours of 下拉列表栏的 Temperature…和 Static Temperature，并在 Options 选择栏中的 Filled 前单击（打勾），单击 Display 按钮，弹出如图 5-43 所示的温度分布云图。由此可见，加热 1h 后整个货舱内的油温没有明显的变化。

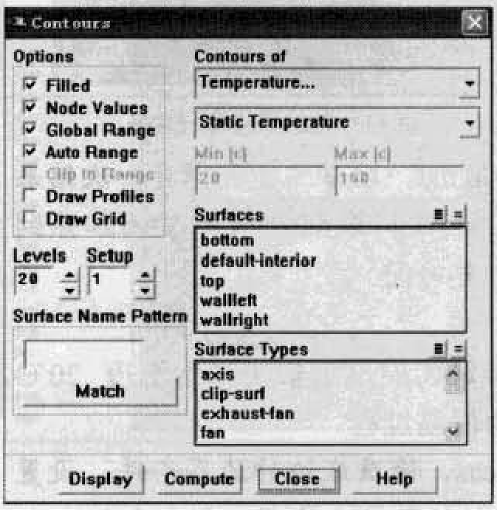


图5-42　Contours 对话框

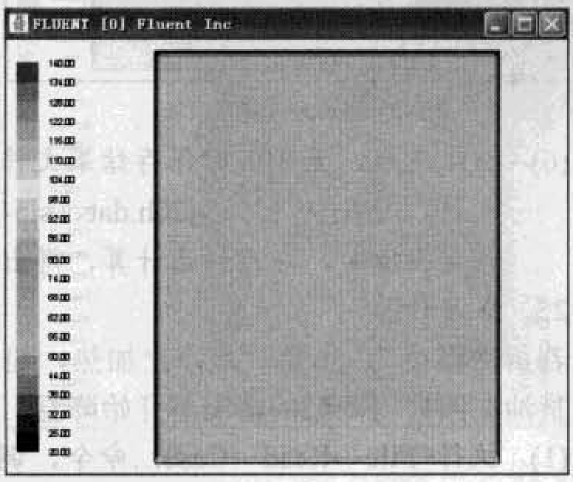


图5-43　加热 1h 后的温度场

(4) 将 Contours of 下拉列表中的选择项换为 Velocity…和 Velocity Magnitude，再次单击 Display 按钮，可得货舱内货油的速度场分布，如图 5-44 所示。由此可见，此时的货油速度很小，最大仅为 0.000017m/s，但在两侧边壁处已体现出对流现象。

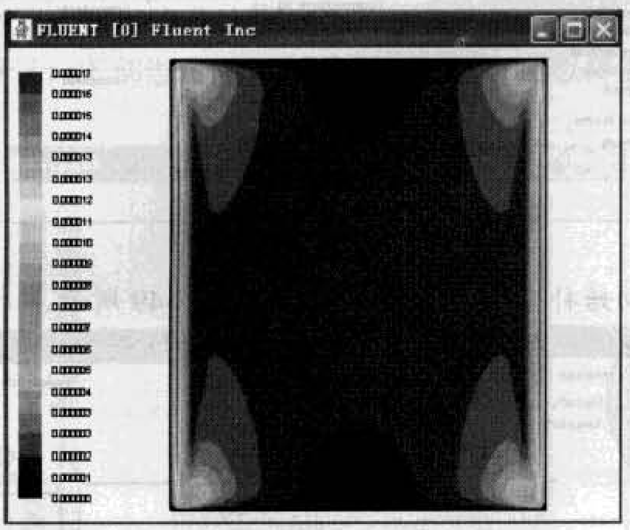


图5-44　加热 1h 后的速度场

(5) 继续迭代 4h，即在 Iterate 对话框内的时间步数内输入 144000。迭代结束后保存结果文件为 sl5-1-j5h.dat。图形处理同前述步骤，得到此时的温度场和速度场如图 5-45 和图 5-46 所示。由此可见，加热 5h 后的温度场变化仍不大，但速度已大于了 1h 时的速度，且对流现象越加明显。

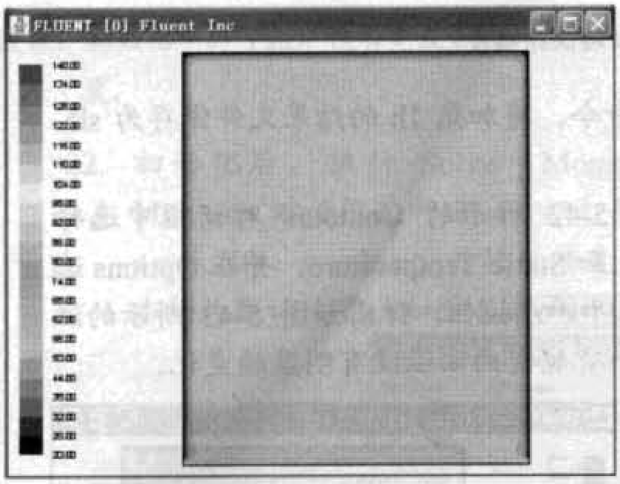


图5-45　加热 5h 后的温度场

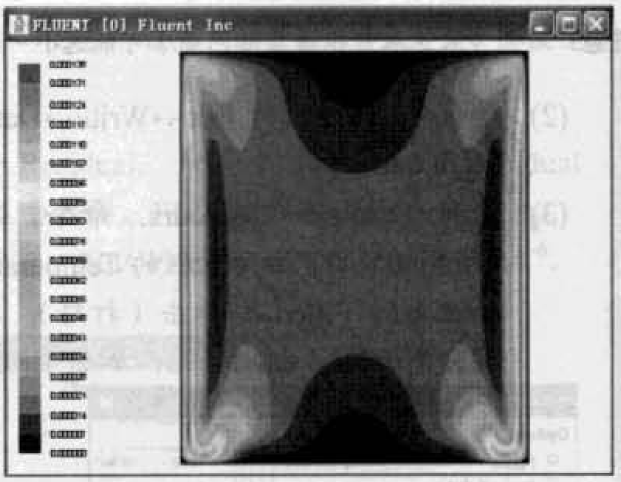


图5-46　加热 5h 后的速度场

(6) 继续迭代，至 10h 时保存结果文件为 sl5-1-j10h.dat，后每隔 10h 保存一次结果文件，分别为 sl5-1-j20h.dat、sl5-1-j30h.dat、sl5-1-j40h.dat。直到货油加热到指定温度时，即可停止计算，得出最终的总加热时间。

25. 保温计算。

若货油温度为 56℃时，停止加热，船底与海水接触，温度近似为海水温度 20℃，此时，货油在四周均低温的情况下开始降温，这个过程为保温过程。

(1) 执行 File→Read→Case…命令，调入 sl5-1-j.cas，修改底边的边界条件，设置温度为 20℃，如图 5-47 所示。

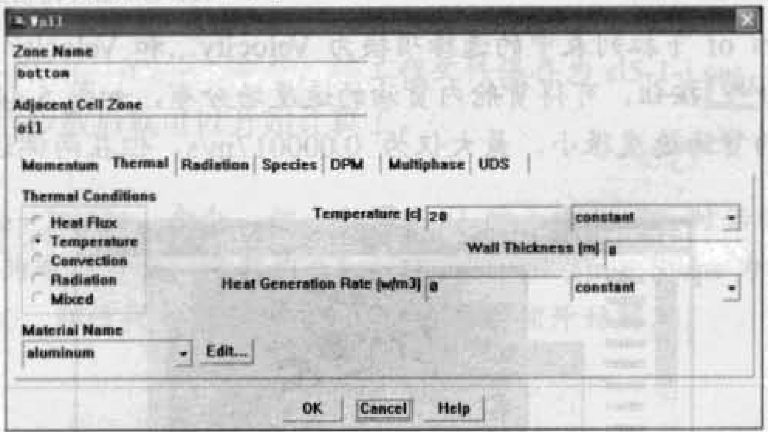


图5-47　底边温度设置

(2) 进行初始化及初始补丁设置，如图 5-48 和图 5-49 所示。

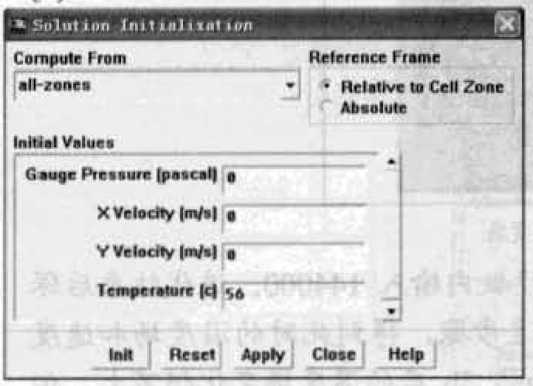


图5-48　初始化

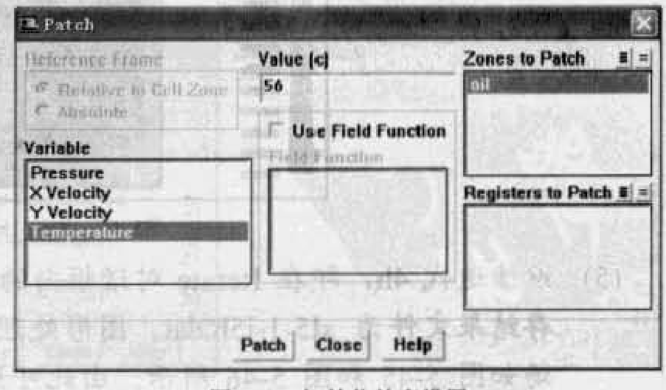


图5-49　初始化补充设置

(3) 执行 File→Write→Case…命令，将工程文件保存为 sl5-1-b.cas。

(4) 与加热计算一样，打开残差曲线监视窗口后，单击 Solve→Iterate...，Time Step Size 为 0.1s，Number of Time Steps 为 36000，单击 Iterate 按钮开始解算。计算结束后，执行 File→Write→Data...命令，将保温 1h 后的结果文件保存为 sl5-1-b1h.dat。执行 Display→Contours...命令，显示温度与速度分布的云图，分别如图 5-50 和图 5-51 所示。由图可见，货油在四周冷壁的环境下开始降温。

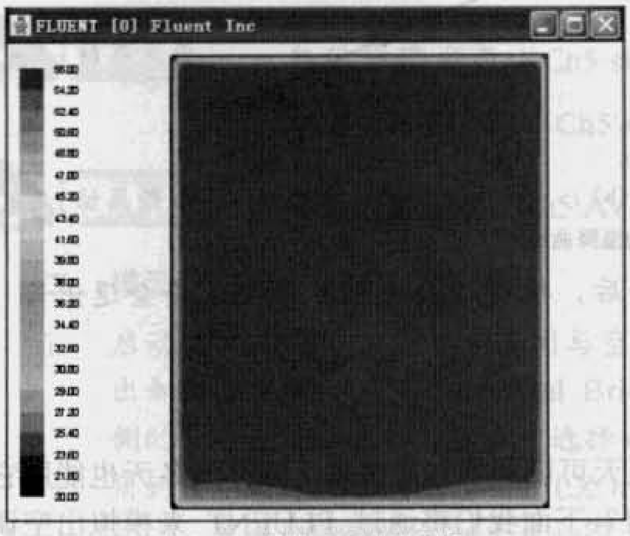


图5-50 保温 1h 后的温度场

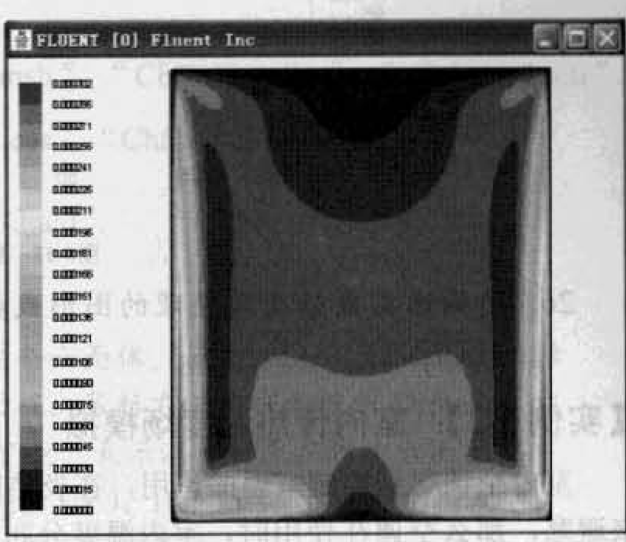


图5-51 保温 1h 后的速度场

(5) 继续迭代，保存 10h 后的结果文件为 sl5-1-b10h.dat，50h 后的结果文件为 sl5-1-b50h.dat，100h 后的结果文件为 sl5-1-b100h.dat，150h 后的结果文件为 sl5-1-b150h.dat。

保温过程中，热量由舱壁向外传递，靠近舱壁处货油密度发生变化，从而使整个油舱内密度不再均匀，引起自然对流运动。150h 后货油的温度如图 5-52 所示，下部温度分布成梯度排列，说明随着时间的增加，温度从上部到下部逐级降低。此时，货舱中心温度已经降至 47.3℃，温度梯度非常明显，下部温度甚至触及凝点温度，所以降温至此又将进行新的一轮加热过程。

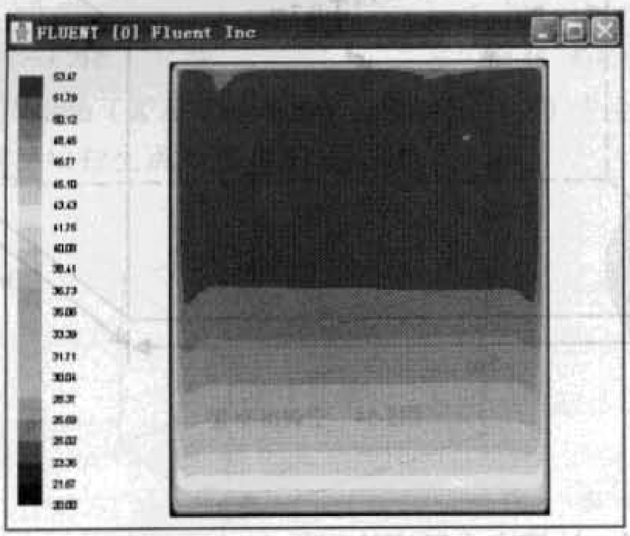


图5-52 保温 150h 后的温度场

注意：计算的过程中，不应一下子设置过多的时间步数，以免错过了温度突变或转折点的时间。

用户还可以通过 XY Plot...读出各时间段货舱中某一点的温度，然后输入 Excel 进行温度与时间曲线的绘制，如货舱中部货油随时间的温降曲线，如图 5-53 所示。

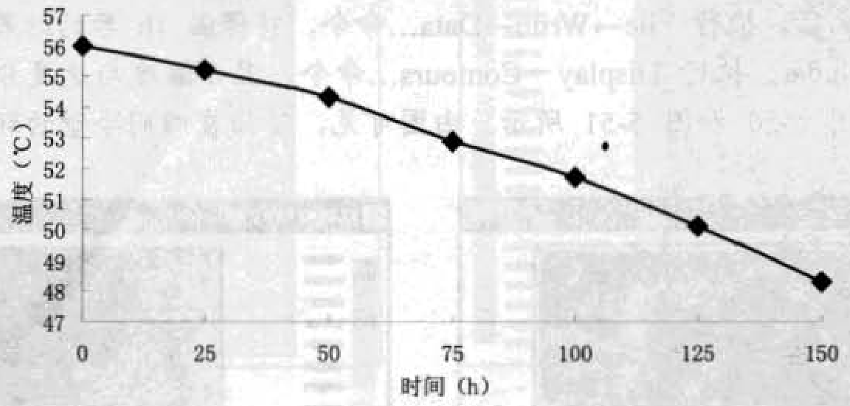


图5-53 货油的温降曲线

26. 待输出需要分析及整理的图形或数据后，执行 File→Exit 命令，安全退出 FLUENT。

【实例 5-2】：室内传热温度场模拟

室内空调起到控制室温的作用，在炎热的夏天可以利用它来祛暑，寒冷的冬天也能用它来避寒，那么空调在使用时，室内温度分布如何？下面我们将通过 FLUENT 来模拟出空调室内的温度场分布。

一、实例概述

图 5-54 所示为典型的室内空调布置图，图中挂壁式空调下方为空气的出口，上方为空气的进口，而对于房间而言，下方为空气进入房间的进口，上方为房间空气进入空调的出口。假设四壁均与外界环境接触，温度为 38℃；上下边界与上下层房间接触，温度为 28℃；空调制冷温度为 22℃，空气进口速度为 0.1m/s。下面针对这一问题计算该室内温度场的分布。

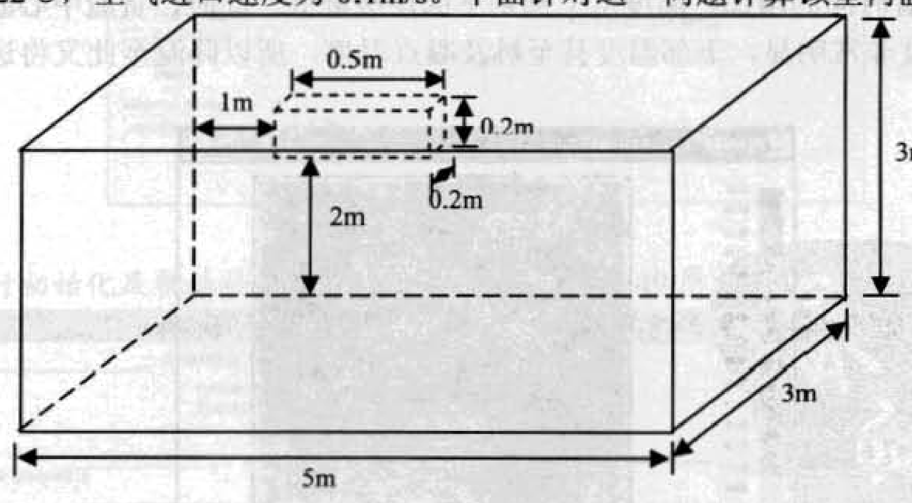


图5-54 空调房布置

思路分析

本例需建立三维模型，计算室内温度达到稳定时的温度分布，故视为定常计算。整个房间的六个壁面均设置为热对流边界，空调下方设置为空气的速度入口，而空调上方设置为自由出口。

通过本实例的演示过程，读者将学习到：

- 三维模型的建立；
- 体与体的相减；
- 热对流边界的设置；
- 后处理切面的设置；
- 图形的局部放大设置。

结果文件——参见附带光盘“Ch5\sl5-2.msh”、“Ch5\sl5-2.dbs”、“Ch5\sl5-2.jou”、“Ch5\sl5-2.trn”、“Ch5\sl5-2.cas”、“Ch5\sl5-2.dat”。

动画演示——参见附带光盘“Ch5\AVI\sl5-2.avi”。

二、模型建立

1. 启动 GAMBIT，直接绘制房间与空调两个六面体。单击 → → ，弹出如图 5-55 所示的 Create Real Brick 面板。鼠标右键单击面板中 Direction 右侧的 Centered，在下拉列表中选择+X+Y+Z，表示以坐标原点作为六面体左下角的顶点进行绘制。在 Width（X）、Depth（Y）、Height（Z）中分别输入 5、3、3，单击 Apply 按钮生成如图 5-56 所示的六面体。

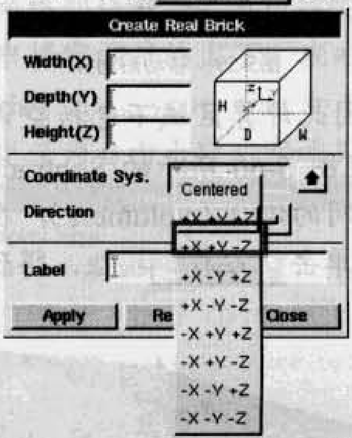


图5-55 Create Real Brick 面板

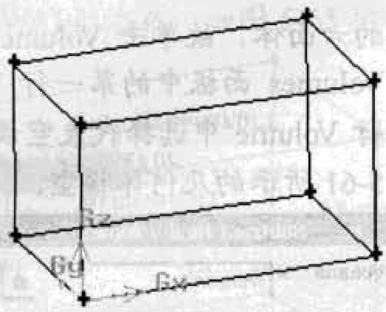


图5-56 绘制好的第一个六面体

2. 接着在该面板的 Width（X）、Depth（Y）、Height（Z）中分别输入 0.5、0.2、0.2，单击 Apply 按钮生成如图 5-57 所示的六面体。

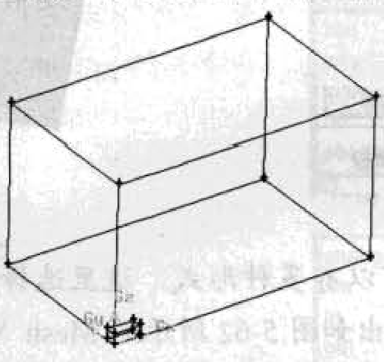


图5-57 绘制好的第二个六面体

3. 下面需要把空调放置在正确的位置，单击 Volume 面板中的 按钮，在弹出

的 Move/Copy Volumes 面板中选中空调（体 2），保持为移动设置（Move 为选中状态，显示为红色），在 x、y、z 输入栏中分别输入 1、2.8、2，表示向这 3 个方向平移的距离，如图 5-58 所示，移动后的两个体的位置如图 5-59 所示。

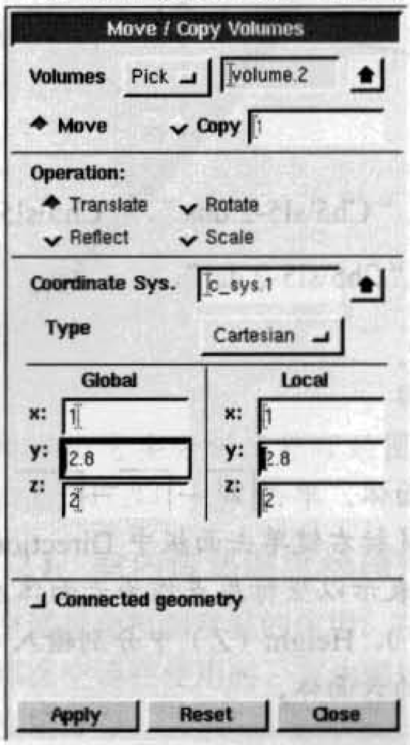


图5-58 Move/Copy Volumes 面板

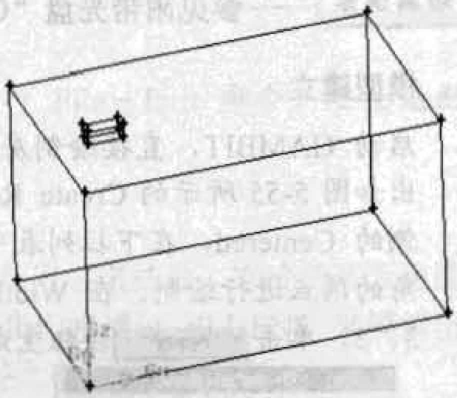


图5-59 移动后的体

4. 由于我们研究的对象是室内空气的传热效应，因此计算区域不包括空调所在的六面体，故单击 Volume 面板中的按钮，在图 5-60 所示的 Subtract Real Volumes 面板中的第一行 Volume 中选择代表房间的体 1（volume.1），在第二行 Volume 中选择代表空调的体 2（volume.2），单击 Apply 按钮，得到如图 5-61 所示的几何体模型。

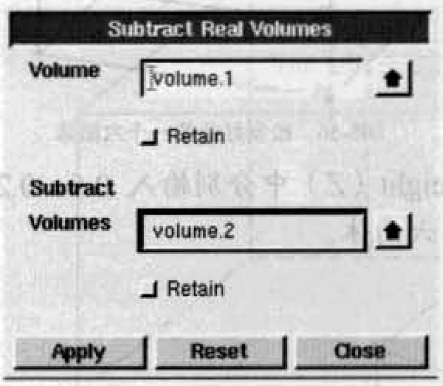


图5-60 Subtract Real Volumes 面板

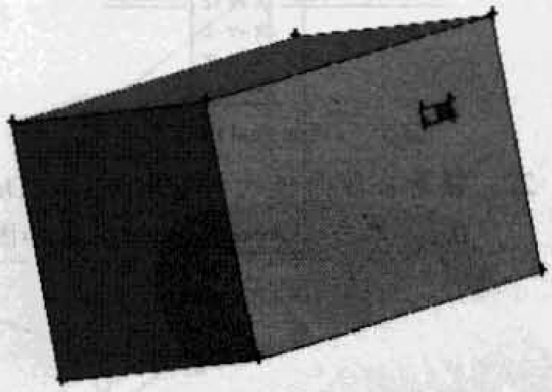


图5-61 绘制好的几何体模型

三、网格划分

1. 对本例的体网格划分可以有多种形式，这里选择直接生成体网格的方式。单击 → → ，弹出如图 5-62 所示的 Mesh Volumes 面板，在 Volumes 右侧的黄色输入栏中选中画好的几何体（volume.1），以 Hex 与 Submap 结合的划分方法进行体网格划分，网格的尺寸设置为 0.05，单击 Apply 按钮生成

体网格，如图 5-63 所示。

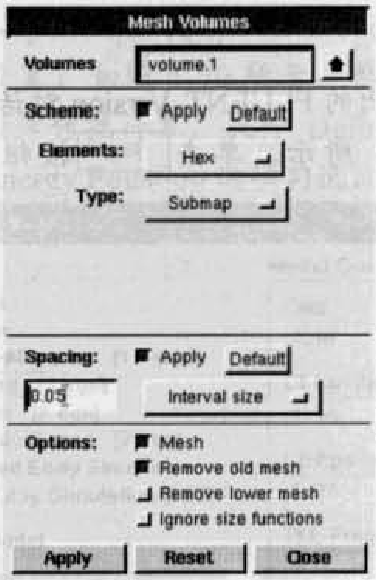


图5-62　Mesh Volumes 面板

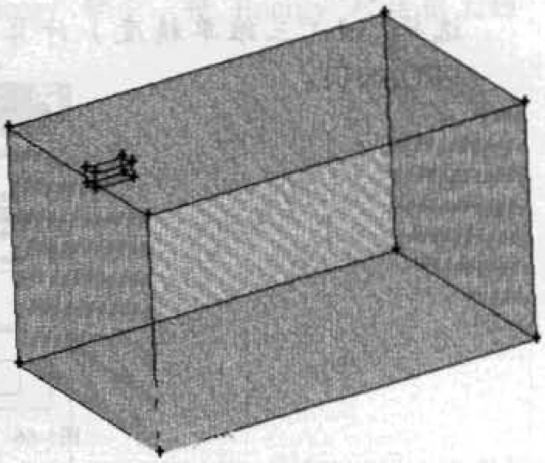


图5-63　绘制好的体网格

2. 单击视图控制面板中的按钮，选中 Examine Mesh 面板中 Range 质量值范围按钮时，面板如图 5-64 所示，最左侧的柱体最高，表示划分的体网格质量较好，可以用于下步计算。

3. 网格划分好后定义边界类型，单击→，在 Specify Boundary Types 面板中将空调房的上下、左右、前后均定义为 WALL 边界，名称分别为 shang、xia、zuo、you、qian 和 hou。将空调下方的面定义为速度进口，空调上方的面定义为自由出口，空调其余的面也定义为壁面 WALL 边界，如图 5-65 所示。

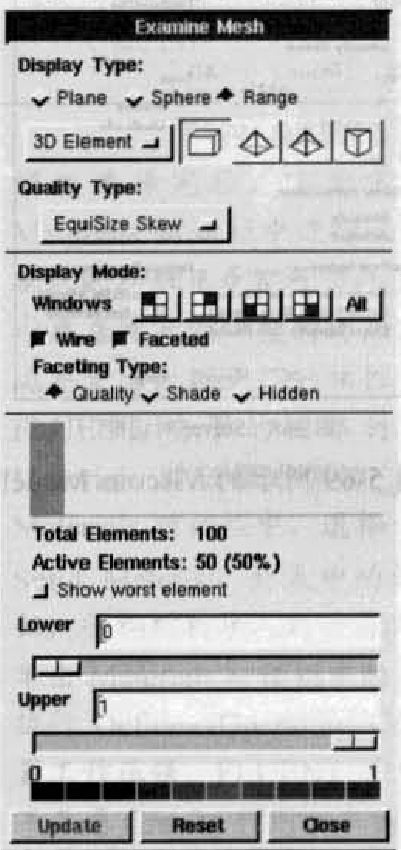


图5-64　网格质量检查

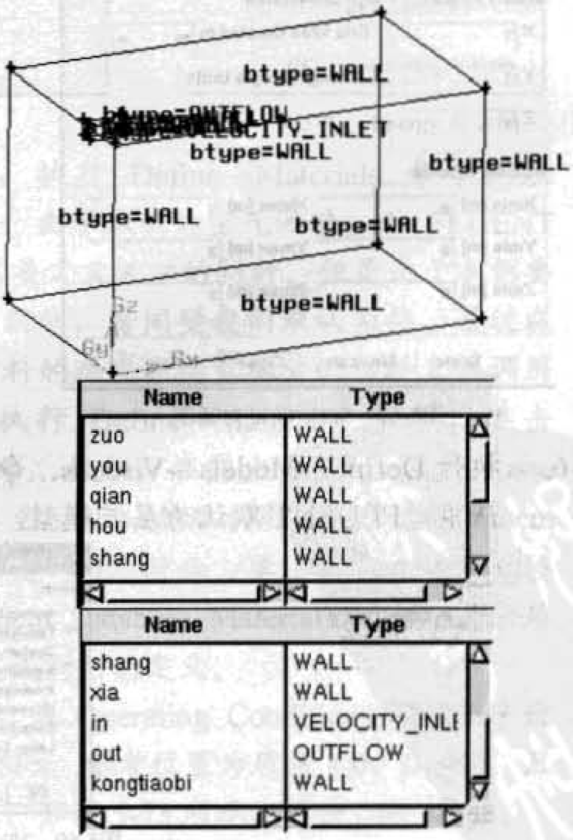


图5-65　定义好的边界类型

4. 最后执行 File→Export→Mesh 命令，将网格输出为 sl5-2.msh。

四、求解计算

1. 双击桌面上的 FLUENT 6.3.26 快捷图标，在弹出的 FLUENT Version 对话框中选择 3d（三维单精度）计算器，如图 5-66 所示，单击 Run 按钮启动 FLUENT。



图5-66 FLUENT 计算器选择

2. 执行 File→Read→Case...命令，读入划分好的网格文件“sl5-2.msh”。
3. 执行 Grid→Check 命令，对网格进行检测，窗口中会显示出检测的基本信息，最后一行为“Done”，表示本例的网格没有问题。
4. 执行 Grid→Scale...命令，从图 5-67 所示的 Scale Grid 对话框中可以看到本例网格的坐标区间。
5. 执行 Define→Models→Solver...命令，弹出 Solver 对话框，如图 5-68 所示。本例为三维压力基定常模型，故保持默认，不做改动，直接单击 OK 按钮。

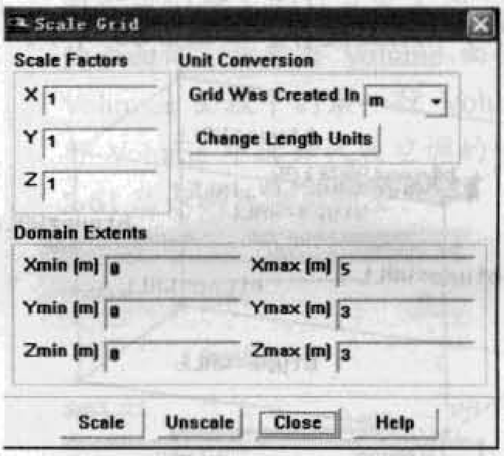


图5-67 Scale Grid 对话框

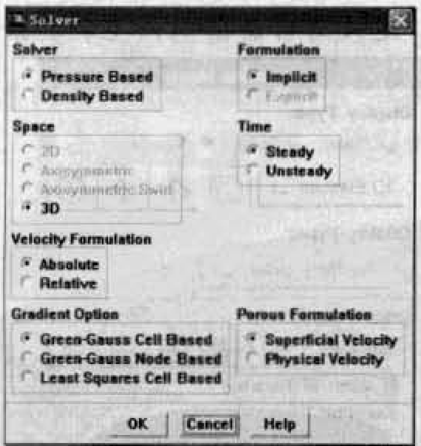


图5-68 Solver 对话框

6. 执行 Define→Models→Viscous...命令，弹出如图 5-69 所示的 Viscous Model 对话框，FLUENT 默认为层流模型。

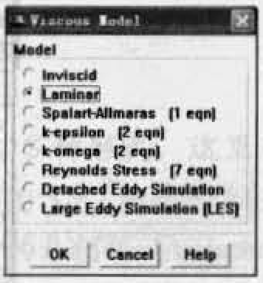


图5-69 Viscous Model 对话框

7. 因本例空气为湍流流动，故选择标准的 k-ε 模型，在 Model 选项中选择 k-epsilon[2 eqn]，在 k-epsilon Model 选项下选择 Standard，保留其他默认设置，如图 5-70 所示，单击 OK 按钮。
8. 激活传热计算，执行 Define→Models→Energy 命令，将 Energy 对话框上的 Energy Equation 选项勾选，如图 5-71 所示。

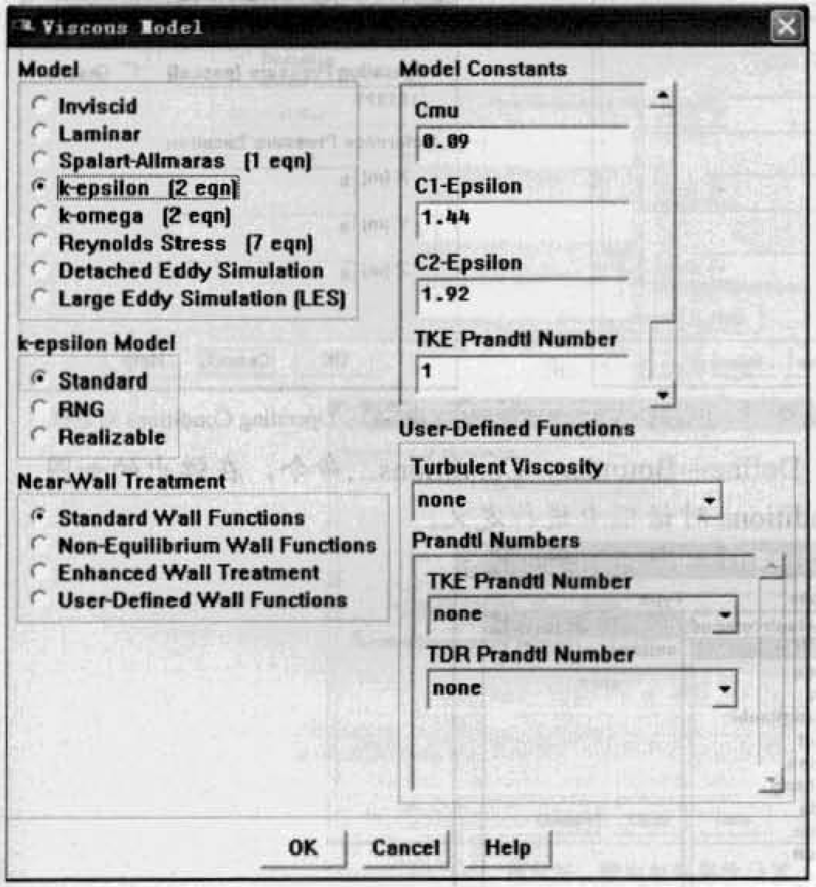


图5-70　湍流模型的设置

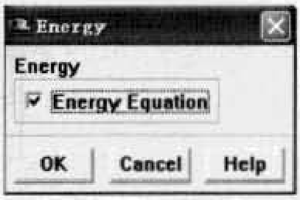


图5-71　Energy 对话框

9. 模型选择完后，下面需要定义材料，执行 Define→Materials 命令，在 Materials 对话框中进行流动材料的定义。由于本例为空气流动，而 FLUENT 默认的材料正是空气（air），故本例不需要定义流动的材料。但是由于本例要考虑房间及空调壁的传热，这两者均为固体，房间壁我们默认为铝，通过在边界定义时改变铝的物性参数来达到材料的改变，而空调壁的材料直接调用 FLUENT 自带的固体材料数据库。执行 Define→Materials 命令，单击 Materials 对话框右侧的 Fluent Database... 按钮，在弹出的 Fluent Database Materials 对话框中，选择 Material Type 为 solid，然后利用滚动条选择 Fluent Solid Materials 列表中的钢（steel），如图 5-72 所示。单击 Copy 和 Close 按钮，将钢材料导入到当前工程并关闭 Fluent Database Materials 对话框。最后单击 Materials 对话框中的 Close 按钮，完成材料的定义。
10. 执行 Define→Operating Conditions 命令，在 Operating Conditions 对话框中设置工作压强。FLUENT 中默认为 101325Pa，参考位置为原点（0，0，0），且不考虑 Gravity 作用，本例保持默认设置，如图 5-73 所示，单击 OK 按钮。

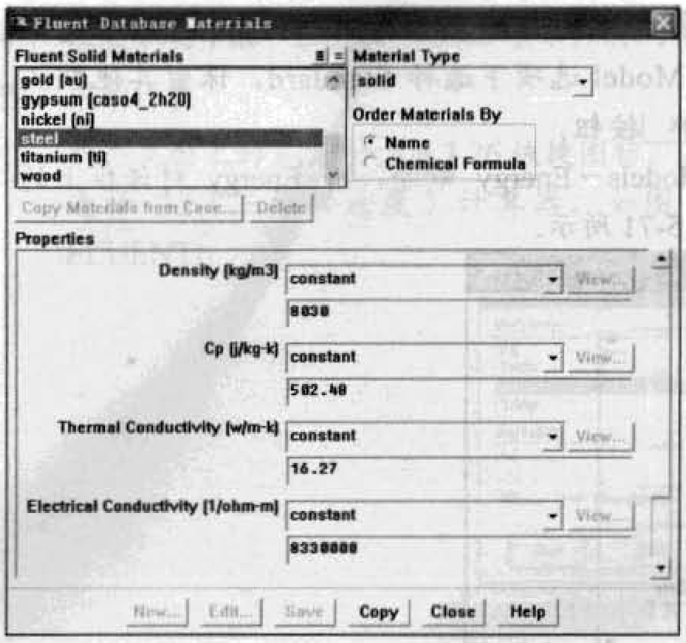


图5-72 空调壁面材料的选取

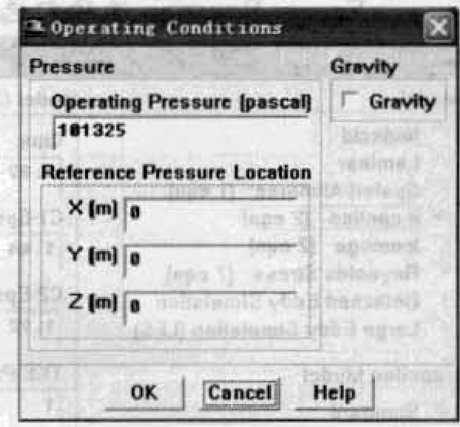


图5-73 Operating Conditions 对话框

11. 下面定义边界数据，执行 Define→Boundary Conditions...命令，在弹出的如图5-74 所示的 Boundary Conditions 对话框中进行定义。



图5-74 Boundary Conditions 对话框

- 由于 fluid 的材料默认为 air，故本例不需要再次定义 fluid。
- 选择 zuo（WALL）边界，单击 Set... 按钮，弹出如图 5-75 所示的 WALL 边界定义对话框。选择 Thermal 子栏，将热边界条件定义为热对流边界，即选择 Thermal Conditions 下方的 Convection。在右侧的 Heat Transfer Coefficient[W/m2-k]中输入 10，在 Free Stream Temperature[k]中输入 311.15，即为 38℃；在 Wall Thickness[m]中输入 0.2m，即壁厚 20cm；保持 Heat Generation Rate[W/m3]为 0，即壁面不是热源。单击左下方材料错右侧的 Edit... 按钮，在弹出的如图 5-76 所示的 Material 对话框中进行适当修改，以使壁面材料更贴近实际。最后单击 OK 按钮，完成左边界的定义。
- 按照同样的方法设置右、前、后、上和下 5 个边界，其中右、前、后 3 个边界的设置与左边界一样，而上和下两个边界与左边界的惟一区别就在于温度设为 301.15K。

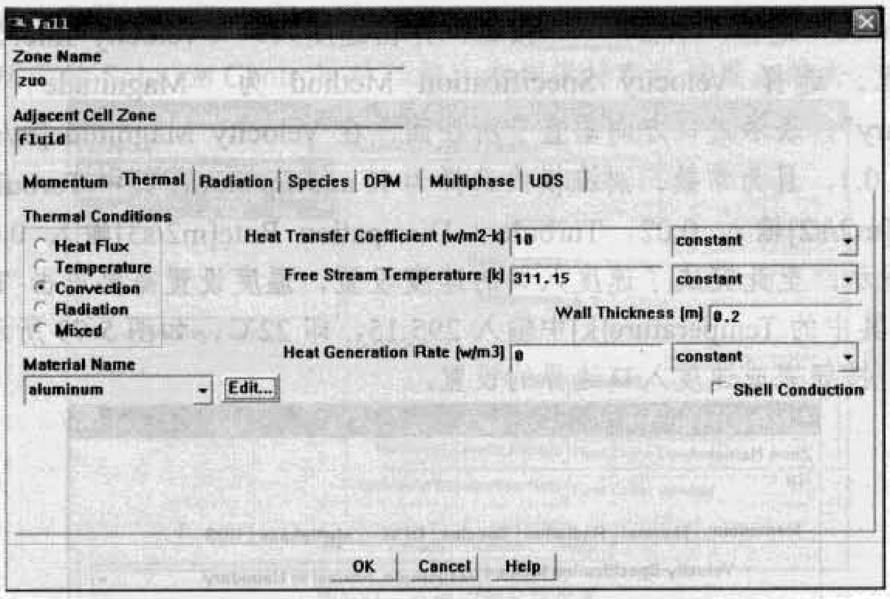


图5-75 左边界定义

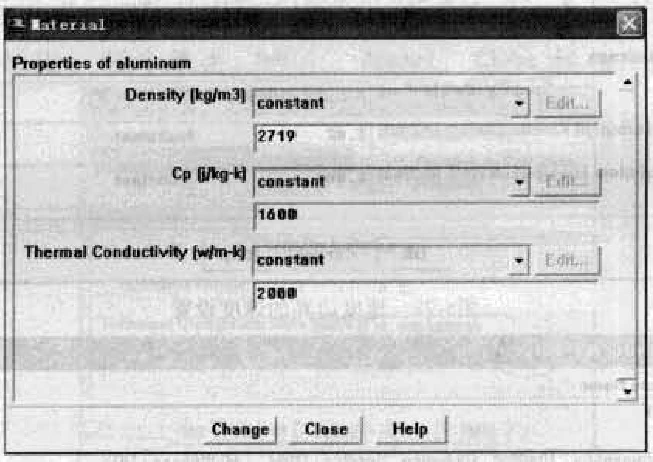


图5-76 壁面材料属性设置

- 空调壁面的设置与房间壁面设置相似，只不过空调边界的温度设为 303.15K，Heat Transfer Coefficient 为 20，Wall Thickness 为 0.002，壁面材料为 steel，如图 5-77 所示。

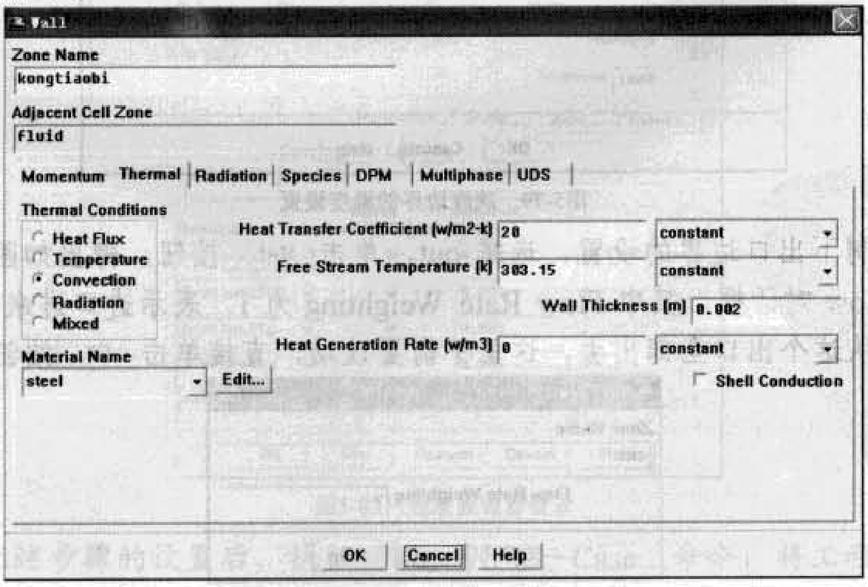


图5-77 空调壁面边界的定义

- 选择 in 入口边界，单击 Set... 按钮，弹出速度入口（Velocity Inlet）边界设置对话框。选择 Velocity Specification Method 为“Magnitude，Normal to Boundary”，表示进口方向垂直于所在面。在 Velocity Magnitude[m/s]的输入栏中输入 0.1，且为常数。湍流模式选择为 K and Epsilon，其中 Turbulent Kinetic Energy[m2/s2]输入 0.02，Turbulent Dissipation Rate[m2/s3]输入 0.008，如图 5-78 所示。至此完成了速度入口的速度设置，温度设置需要单击 Thermal 子栏，在其中的 Temperature[k]中输入 295.15，即 22℃，如图 5-79 所示。最后单击 OK 按钮完成速度入口边界的设置。

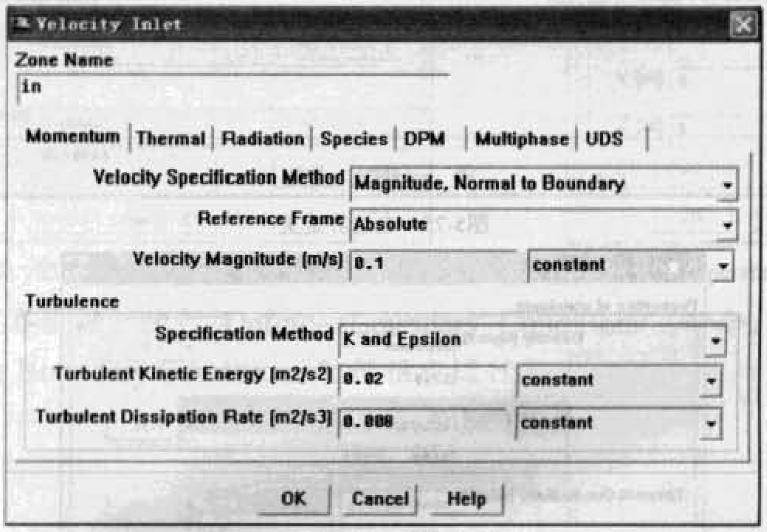


图5-78　速度边界的速度设置

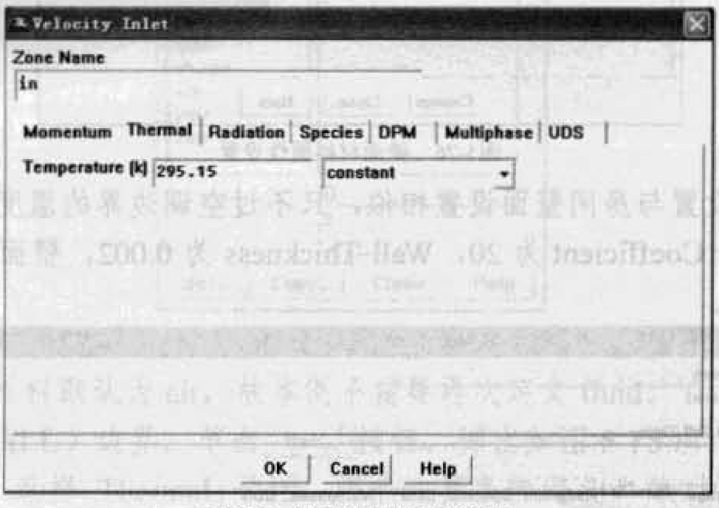


图5-79　速度边界的温度设置

- 最后还剩下出口边界的设置，选择 out，单击 Set... 按钮，弹出如图 5-80 所示的 Outflow 对话框，其中 Flow Rate Weighting 为 1，表示进口进来的总质量流体都将从这个出口全部出去，这里不需要改动，直接单击 OK 按钮即可。

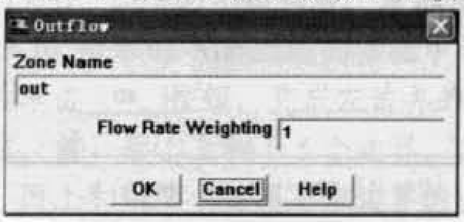


图5-80　出口边界的设置

12. 下面对求解参数进行设置，执行 Solve→Control→Solution...命令，弹出如图5-81所示的 Solution Controls 对话框，本例保持默认设置，单击 OK 按钮。

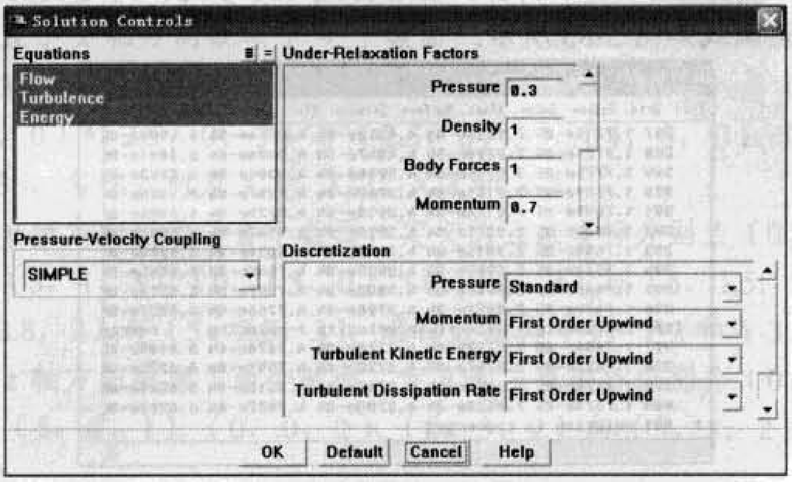


图5-81 求解控制参数设置

13. 执行 Solve→Initialize→Initialize...命令，在 Solution Initialization 对话框中选择 in，对进口初始化，顺序单击 Init 、Apply 、Close 按钮，如图5-82所示。

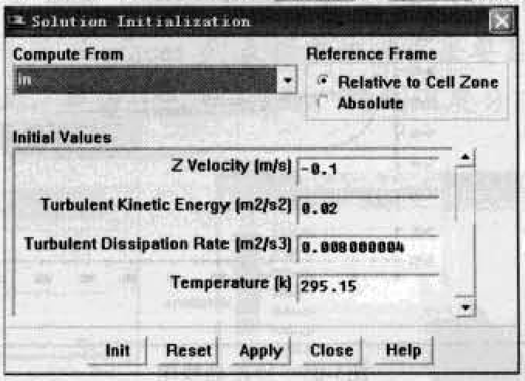


图5-82 速度入口初始化

14. 初始化后，执行 Solve→Monitors→Residual...命令，在弹出的 Residual Monitors 对话框选中 Plot，如图5-83所示，以动态显示计算残差曲线。

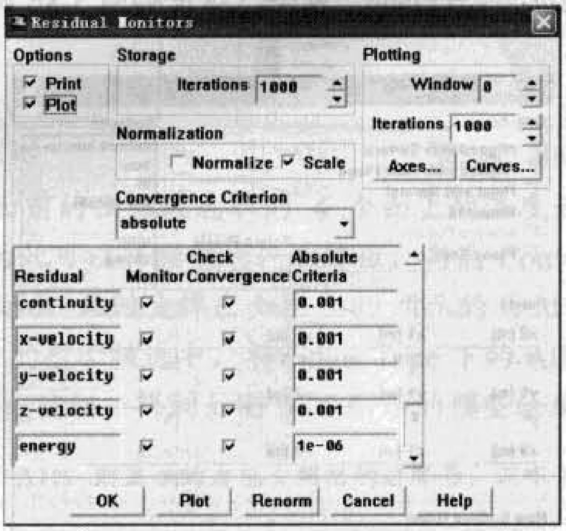


图5-83 残差监视器设置

15. 完成上述步骤的设置后，执行 File→Write→Case...命令，将工程文件保存为 sl5-2.cas。

■传热分析 第5章■

16. 执行 Solve→Iterate...命令，设置 Iterate 对话框中的 Number of Iterations 为 1000，单击 Iterate 按钮开始解算。当计算到 401 步时，问题收敛，如图 5-84 所示，其残差曲线如图 5-85 所示。

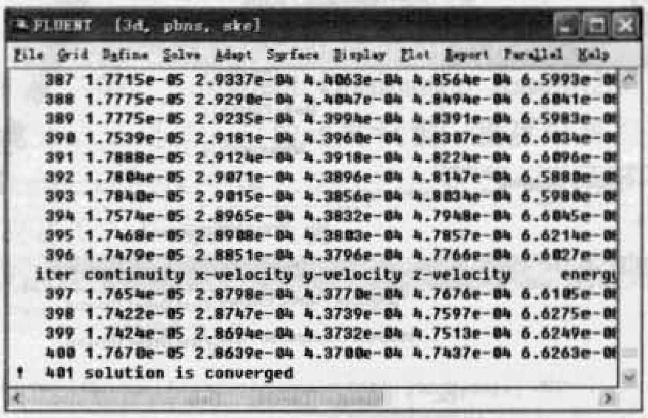


图5-84 问题收敛提示

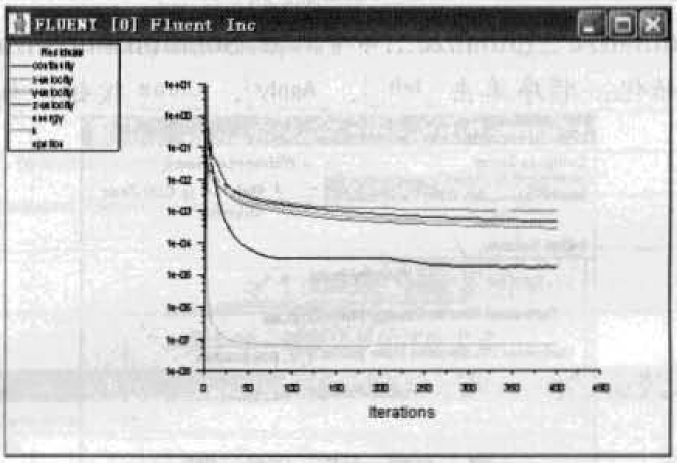


图5-85 残差曲线图

17. 由于本例为三维问题，全区域显示图形计算结果不仅显示速度慢，且不易辨析，因此需要切取几个具有代表性的剖面，通过分析剖面上的分布来反应整体的分布。执行 Surface→Plane...命令，弹出如图 5-86 所示的 Plane Surface 对话框。



图5-86 Plane Surface 对话框

18. 在 Plane Surface 对话框的 Points 下方的 3 个坐标点内输入能够惟一确定一个面的三点坐标值，并在 New Surface Name 中输入易于分辨的名字。

- 本例在垂直于 x 轴方向截取了 4 个截面，定义的三点坐标分别为（1，0，0）、（1，0，3）与（1，3，3），（1.25，0，0）、（1.25，0，3）与（1.25，3，3），（2.5，0，0）、（2.5，0，3）与（2.5，3，3），（4，0，0）、（4，0，3）与（4，3，3），名称分别为 X-1、X-2、X-3 和 X-4。
- 在垂直于 y 轴方向截取了 3 个截面，定义的三点坐标分别为（0，1，0）、（0，1，3）与（5，1，3），（0，1.5，0）、（0，1.5，3）与（5，1.5，3），（0，2.8，0）、（0，2.8，3）与（5，2.8，3），名称分别为 Y-1、Y-2 和 Y-3。
- 在垂直于 z 轴方向截取了两个截面，定义的三点坐标分别为（0，0，1）、（0，3，1）与（5，3，1），（0，0，2）、（0，3，2）与（5，3，2），名称分别为 Z-1 和 Z-2。

19. 最后单击 Create 和 Close 按钮，完成切面的定义。

20. 执行 Display→Contours…命令，在图 5-87 所示的 Contours 对话框中选择 Contours of 下拉列表中的 Temperature…和 Static Temperature，选中 Options 选择栏中的 Filled，并在 Surfaces 列表框中依次单击要显示的截面，先选取“X-1”至“X-4” 4 个面，单击 Display 按钮，得到温度分布如图 5-88 所示。



图5-87 Contours 对话框

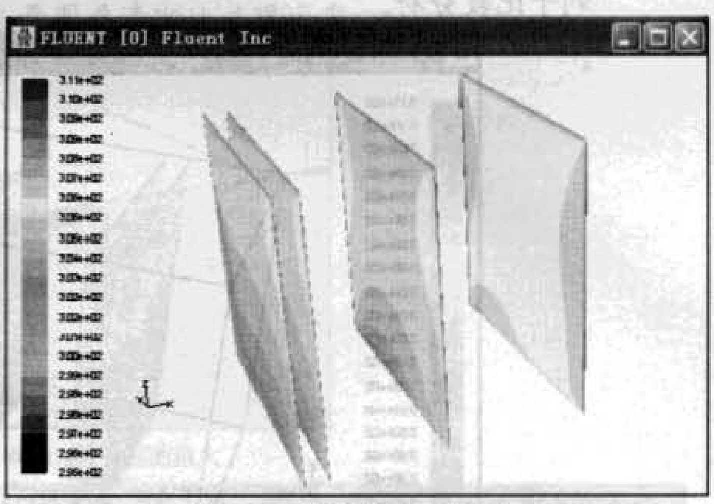


图5-88 温度云图的首次显示

21. 此时呈现在读者面前的仅为被选取的 4 个面上的温度云图，但具体的位置不能很快地判定，为此可以将模型的轮廓给出，勾选 Contours 对话框 Options 选择栏中的 Draw Grid，此时会弹出如图 5-89 所示的 Grid Display 对话框。保持 Surfaces 列表栏中的壁面被选中，将 Edge Type 下的 All 转换成 Outline，其余不变，单击 Display 按钮，得到如图 5-90 所示的模型轮廓线。

注意： 若保持 Edge Type 选为 All，则显示的为包含网格的边界面。而本例模型相对复杂，网格较密，若显示网格则不利分辨。

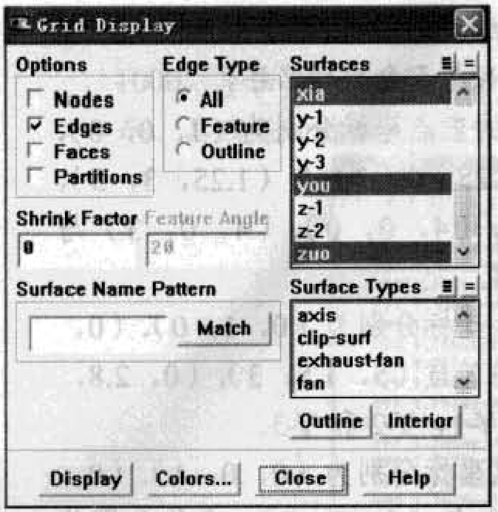


图5-89　Grid Display 对话框

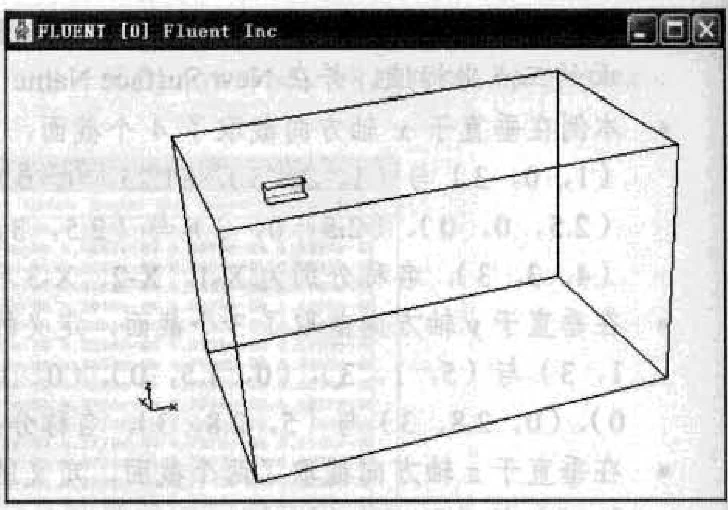


图5-90　模型轮廓线

注意：通过 Grid Display 对话框除了可以显示轮廓线之外，还可以显示节点、网格、面等模型元素，用户可按需选取。

22. 生成轮廓线后单击 Close 按钮关闭 Grid Display 对话框，回到 Contours 对话框中，再次单击 Display 按钮，得到第二次温度分布，如图 5-91 所示。此时，温度云图为形象直观的视图呈现，读者可以清晰地看到各截面的相对位置，有利于比较分析。

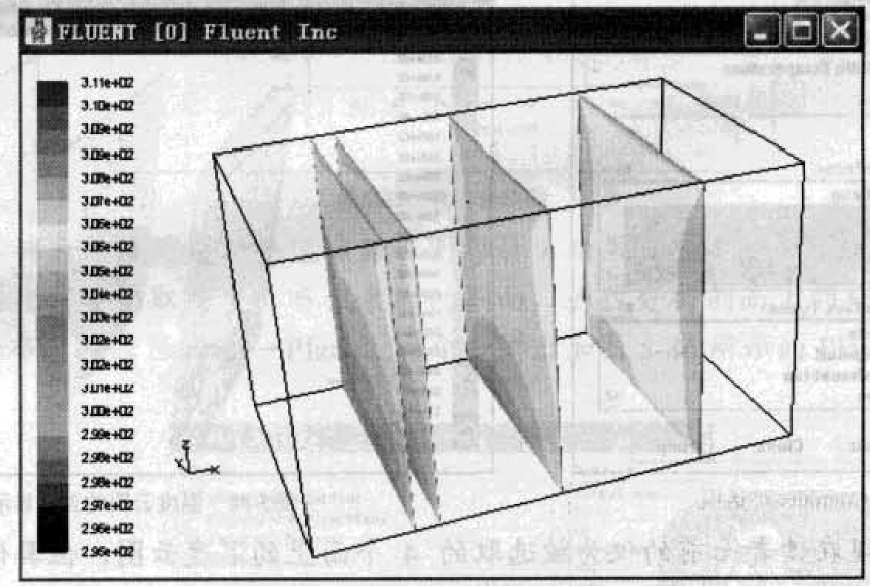


图5-91　垂直于 x 轴截面的温度云图二次显示

23. 以同样的方法分别显示垂直于 y 轴和 z 轴截面的温度云图，如图 5-92 和图 5-93 所示。由图可见，在空调房内不同位置的温度不一样，空调下方的温度最低，即为最凉快的地方。离空调距离越远处的温度越高，如 X-4 和 Y-1 截面的温度就相对较高。因此，在平常的家庭生活中，要根据自身的身体条件和外在环境选择合适的空调房内的生活位置，达到祛暑效果的同时避免生病。

注意：鼠标左键可拖动图形窗口中的视图，鼠标中键可缩小和放大图形视图，用户可结合起来使用，使图形以最佳位置呈现。

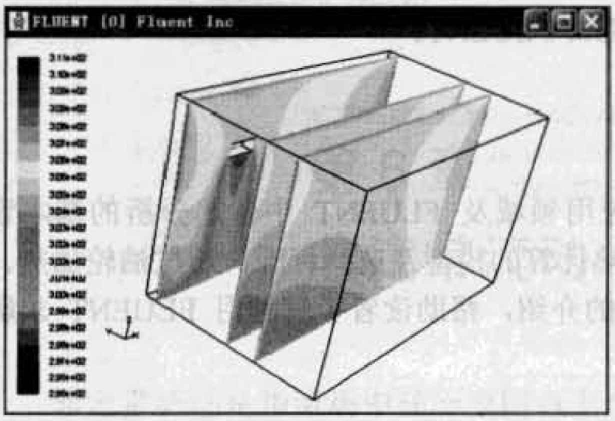


图5-92　垂直于 y 轴截面的温度云图

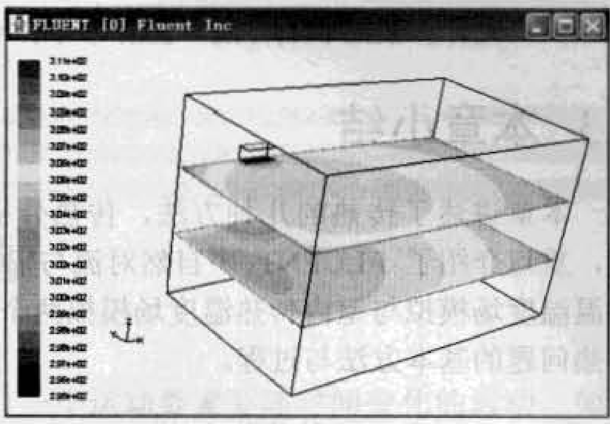


图5-93　垂直于 z 轴截面的温度云图

24. 鼠标中键框取 Z-2 截面空调附近的云图，则该处温度云图得以放大，如图 5-94 所示，通过图形的放大，可以帮助读者更清晰地分辨温度的变化细节。

25. 执行 Display→Vectors...命令，弹出 Vectors 对话框，如图 5-95 所示。选取 Vectors of 列表中的 Velocity 和 Color by 列表中的 Velocity...及 Velocity Magnitude，选中 Surfaces 列表中要呈现的截面 Y-3，将左侧的 Scale 改为 2，单击 Display 按钮，得到如图 5-96 所示的速度矢量图，从图中可以看到该截面上空气的运动情况。用户还可以通过 Vectors 对话框中的 Scale 与 Skip 来调节矢量图中箭头的大小及密度，使矢量图更清晰地呈现出来。

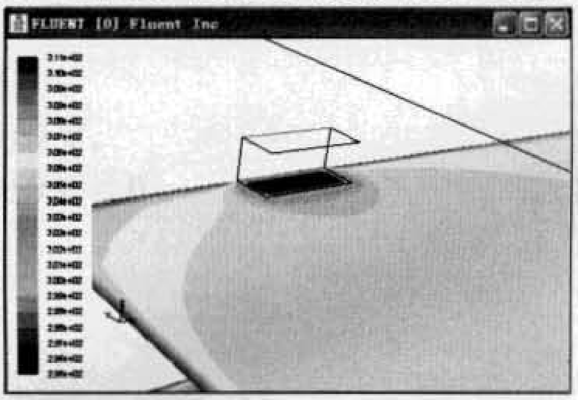


图5-94　Z-2 截面温度云图的放大

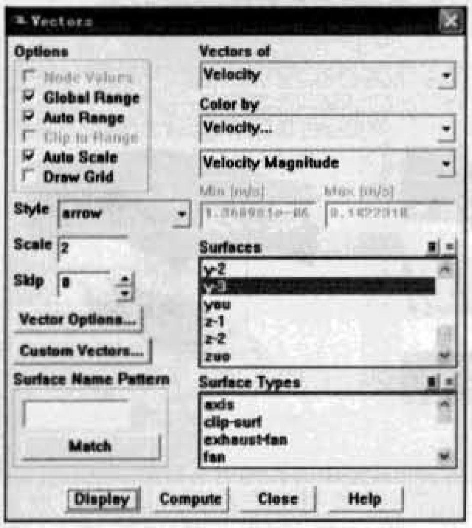


图5-95　Vectors 对话框

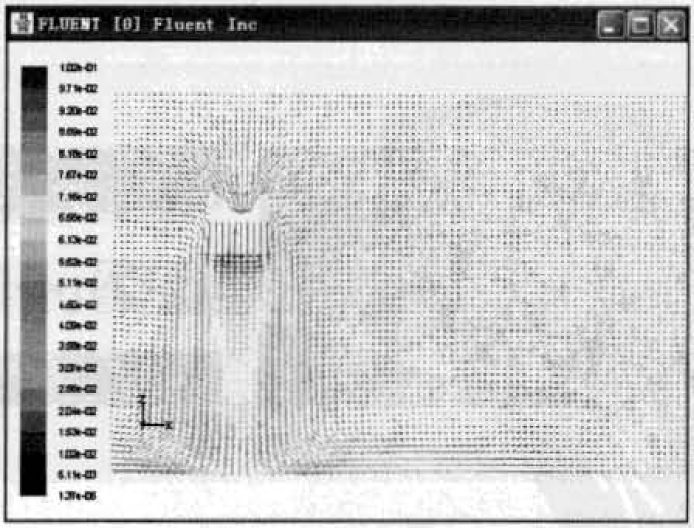


图5-96　截面的速度矢量图

26. 执行 File→Write→Case&Data...命令，将计算结果保存为 sl5-2.cas 和 sl5-2.dat 文件。最后执行 File→Exit 命令，安全退出 FLUENT。

5.3 本章小结

本章讲述了传热的几种方法，传热分析的应用领域及 FLUENT 中传热分析的基本设置，重点介绍了 FLUENT 中自然对流与辐射传热计算的模型及选择标准，通过油轮加热、保温温度场模拟与室内传热温度场模拟两个实例的介绍，帮助读者了解利用 FLUENT 求解传热问题的基本方法与过程。

备忘录

- 3 种传热方法。
- 辐射传热的 5 种模型及选择标准。
- 利用 FLUENT 求解传热问题的操作过程。

第 6 章 非定常流动问题

非定常流动是指流场中任一空间点上至少有一个运动要素要随时间变化的流动，如速度、压强、密度、温度等。实际工程中的绝大部分问题都是非定常流动问题，相比定常问题具有极大的复杂性，光靠理论或实验研究十分困难，通过 FLUENT 等数值模拟软件来模拟非定常流动问题可以大大节约成本与时间，且计算结果亦能准确反映流动要素的变化过程。

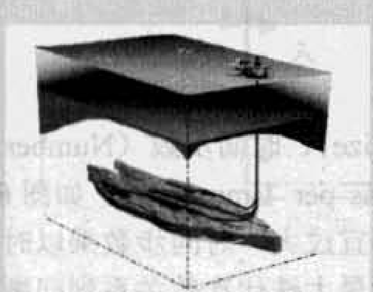
本章将介绍非定常流动问题的概念及如何在 FLUENT 中启动非定常流动问题的计算，通过典型的非定常流动问题——圆柱绕流分析实例的介绍，帮助读者认识和了解非定常问题的模拟过程，熟悉解算非定常问题的思路。

本章要点

- 非定常流动的概念。
- 非定常流动问题的设置。
- 非定常流动问题的分析过程。

本章案例

- 圆柱绕流分析。







6.1 概述

流体是由连续分布着的质点所组成的。在运动的情况下，一个质点在某一瞬时占据在一定的空间点上，具有一定的速度、压力、密度及温度等标志流体运动状态的运动要素。一般来说，这些运动要素都是空间坐标和时间的连续函数。

按流动要素是否随时间变化可以将流体流动分为定常流动与非定常流动。定常流动（又称稳定流或恒定流）是指流场中任一空间点上各运动要素均不随时间变化的流动，而非定常流动（又称非稳定流或非恒定流）中至少有一个运动要素要随时间变化。

在实际工程中，绝大部分的流动问题都是非定常流动，如开关输液管路阀门的过程、水泵泵吸过程、空调房的温降过程、闸门放水过程、溃坝过程、圆柱绕流的漩涡脱落过程、水面波浪问题、具有周期性的流动过程等。非定常流动的运动要素时刻变化，因此研究起来有很大的难度。在 FLUENT 中，执行 Define→Models→Solver...命令，打开 Solver 对话框，可以选择流动问题是否与时间相关，其中 Steady 为定常流，Unsteady 为非定常流，如图 6-1 所示。选择 Unsteady 非定常流动时，还可选择是一阶隐式或二阶隐式格式（选择 Unsteady Formulation 下方的 1st-Order Implicit 或 2st-Order Implicit）。需要注意的是，对于三维湍流模型中的大涡模拟（LES）和离散涡模拟（DES），因其本身需要在时间上进行统计，所以只能用非定常流动进行模拟。

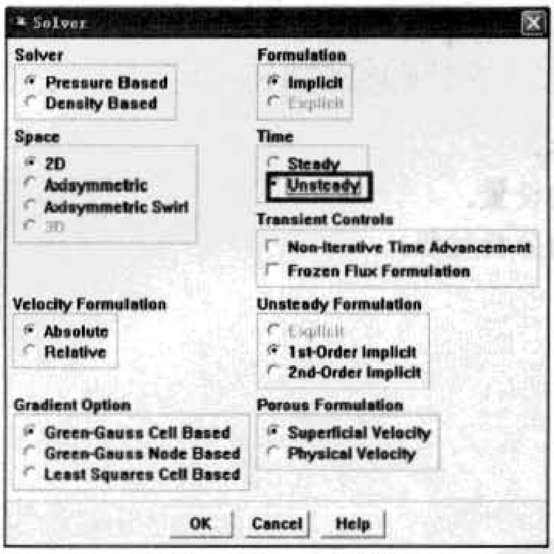


图6-1 Solver 对话框

6.2 非定常流动的分析过程

非定常流动在迭代计算时，需要设置时间步长（Time Step Size）、时间步数（Number of Time Steps）及一个时间步所占用的最大迭代次数（Max Iterations per Time Step），如图 6-2 所示。这 3 个参数均需根据实际问题具体设置，其中时间步长不宜过大，时间步数乘以时间步长为一次迭代计算问题所经过的时间，而一个时间步所占用的最大迭代次数关系到问题的收敛性。读者在计算时，要合理设置时间步长与时间步数，及时观察流动要素的变化，以免错过流动要素变化曲线的转折点；另外，一个时间步所占用的最大迭代次数要适中，尽可能地加快问题的收敛速度。

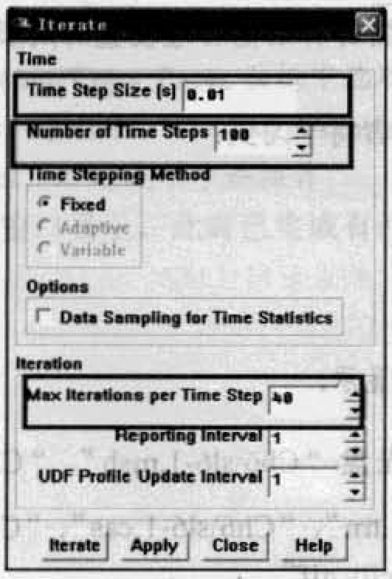


图6-2 非定常问题迭代设置

下面介绍一个典型的非定常流动问题的模拟过程。

【实例 6-1】：圆柱绕流分析

在一定流动条件下，粘性流体绕过钝尾体会产生涡。在钝尾体后面存在一死水区，其宽度略小于物体尾部横向尺寸。在这个死水区的边界上会出现一系列的涡，如圆柱绕流的雷诺数在一定范围时，流体在圆柱表面的后驻点附近脱落，脱体漩涡以周期性的交替方式离开圆柱表面，形成了著名的卡门涡街。涡街的存在使得柱面周期性变化的升力和阻力增加，从而导致物体的振动，影响了柱体的稳定性。实际生活中，近似圆柱绕流的现象普遍存在，如桥墩绕流、海洋钻采平台的支柱绕流、潜水艇的潜望镜柱体绕流等；当涡街发生时，周围的流场有怎样的变化，对它们的影响有多大，这是我们需要分析的。

一、实例概述

本例模拟在一定雷诺数条件下产生卡门涡街时的圆柱绕流现象。图 6-3 所示为本例的几何模型简图，其中圆柱直径为 0.02m，计算区域为 0.6m×1.0m，圆柱位于图示位置，左侧流体入口速度为 0.01m/s，右侧出口为自由出流。若流体为水，其密度为 998.2kg/m^3，动力粘度为 0.001003kg/（m·s），则雷诺数为 199.04，为层流流动。

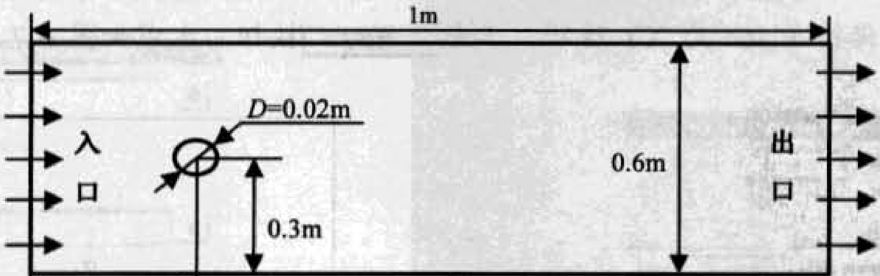


图6-3 圆柱绕流几何模型简图

思路分析

本例为二维非定常流动问题，模型建立相对简单，网格划分可采用分块划分或者非结构

网格，导入 FLUENT 启动非定常计算后需合理设置时间步长，并进行动画的保存与回放，以得到动态的漩涡脱落过程。

通过本实例的演示过程，读者将学习到：

- 非结构网格划分；
- 非定常设置；
- 升力、阻力系数监视；
- 动画的录制与回放；
- 速度矢量图、涡量图的显示。

结果文件——参见附带光盘“Ch6\sl6-1.msh”、“Ch6\sl6-1.dbs”、“Ch6\sl6-1.jou”、“Ch6\sl6-1.trn”、“Ch6\sl6-1.cas”、“Ch6\sl6-1.dat”、“Ch6\velocity.gif”、“Ch6\vorticity.gif”。

动画演示——参见附带光盘“Ch6\AVI\sl6-1.avi”。

二、模型建立

本例模型需要建立两个面域，然后进行布尔操作，生成如图 6-3 所示的几何模型。

1. 单击 → → ，在 Create Real Rectangular Face 面板的 Width 和 Height 中分别输入 1 和 0.6，单击 Apply 按钮，如图 6-4 所示，矩形中点与原点重合。
2. 鼠标右键单击 按钮，在弹出的列表中单击 按钮，如图 6-5 所示。

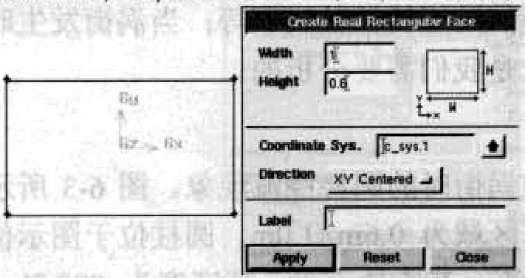


图6-4 矩形区域生成

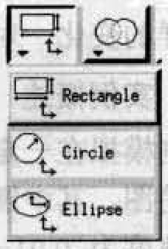


图6-5 选择圆形绘制命令

3. 在图 6-6 所示的 Create Real Circular Face 面板的 Radius 中输入圆柱的半径 0.01，保持 Plane 为 XY 选项，单击 Apply 按钮，生成如图 6-7 所示的圆形区域。

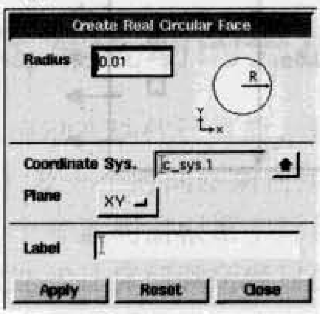


图6-6 圆形绘制面板

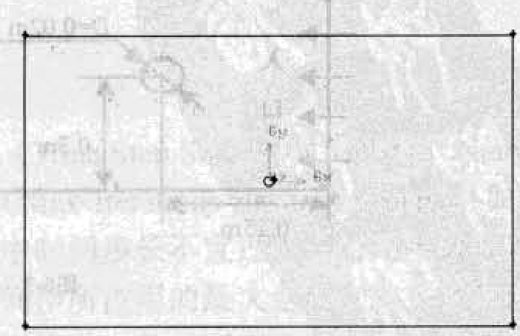


图6-7 生成的圆形区域

4. 此时的圆面是以原点为中点，半径为 0.01 的圆，需要移动其至正确位置，即

需要向 x 轴负向移动 0.25m。单击 Face 面板中的 （Move/Copy）按钮，在弹出的如图 6-8 所示的 Move/Copy Faces 面板中选取面 2（face.2），保持 Move 为红色选中状态，选择 Operation 下方的 Translate（平移），在 x 栏输入 -0.25，单击 Apply 按钮，即完成了平移操作。

图 6-9 所示为圆面移动后的窗口显示，此时已生成有两个面，下面需要进行布尔减操作，以生成本例的计算区域。

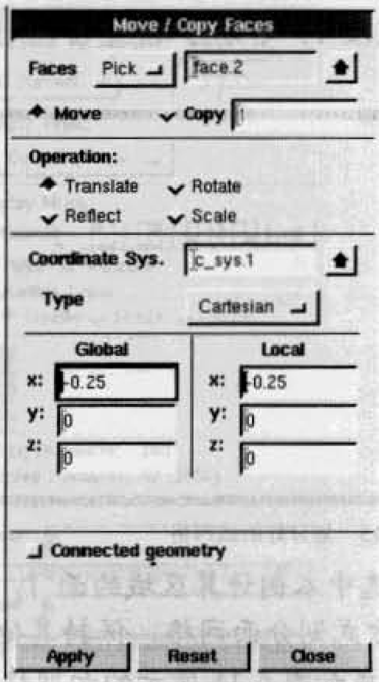


图6-8 Move/Copy Faces 面板

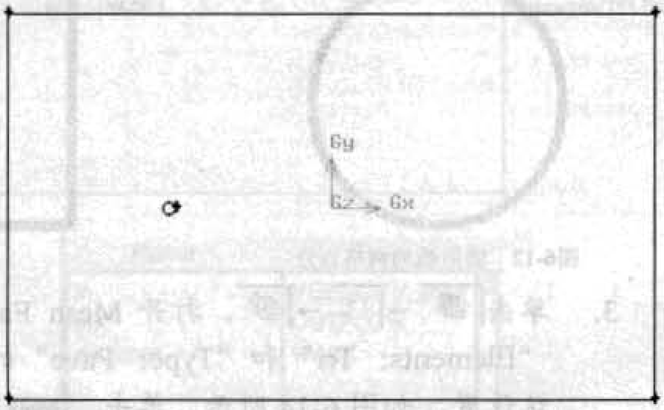


图6-9 移动后的圆形面

5. 单击 Face 面板中的 按钮，在弹出的 Subtract Real Faces 面板的第一行 Face 中选取 face.1（矩形面域），在第二行 Faces 中选取 face.2（圆形面域），如图 6-10 所示；单击 Apply 按钮，完成布尔减操作。此时的图形窗口与图 6-9 一样，但是中间的面域已经被剪去，为了能够直观地观察到图形的变化，可以单击右下角视图控制面板中的 按钮，这时就可以看到计算区域呈灰色显示，如图 6-11 所示。

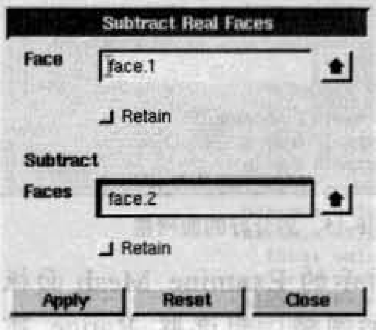


图6-10 Subtract Real Faces 面板

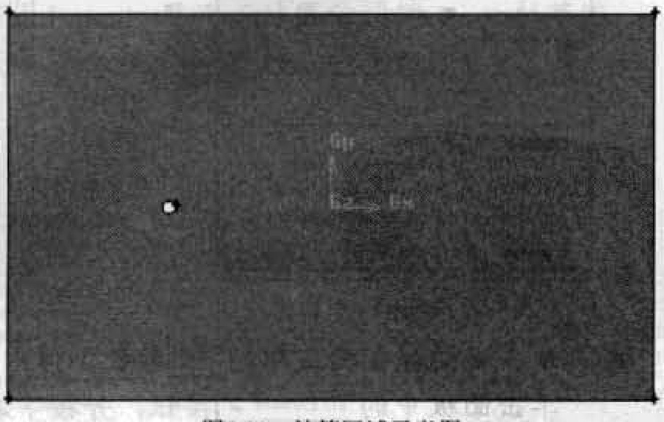


图6-11 计算区域示意图

三、网格划分

下面对计算区域进行网格划分，虽然本例的计算区域较简单，但网格划分采取分块划分

时则比较复杂，这里我们采用非结构化网格划分方法，同样可以生成高质量的网格。

1. 单击[按钮]→[按钮]→[按钮]，在 Mesh Edges 面板的 Edges 黄色输入栏中选取线段 6（edge.6），选择 Interval Count 分段方式，并在左侧输入栏中输入 80，保持其他默认设置，单击 Apply 按钮，生成线段 6（圆周）的线网格，如图 6-12 所示。
2. 用同样的线网格划分方式将矩形区域的上、下两条线（线段 1 和线段 3）划分为 80 等份，将矩形的左、右两条线（线段 2 和线段 4）划分为 40 等份，划分好的线网格如图 6-13 所示。

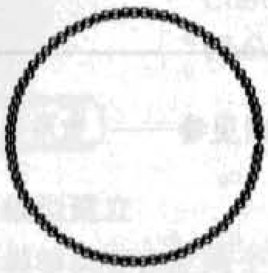


图6-12　圆周线的网格划分

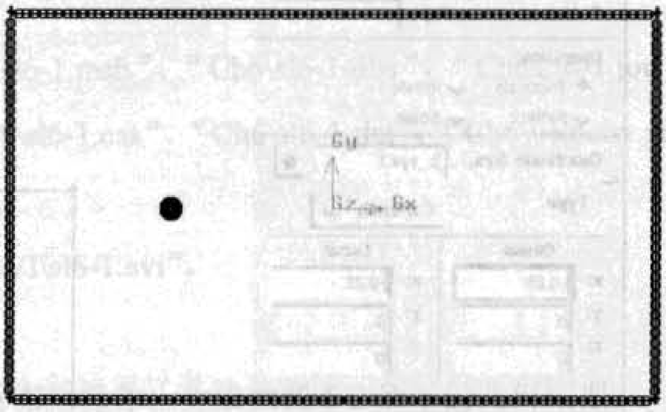


图6-13　划分好的线网格

3. 单击[按钮]→[按钮]→[按钮]，打开 Mesh Faces 面板，选中本例计算区域的面 1，以"Elements: Tri"和"Type: Pave"的网格划分方式划分面网格，保持其他默认设置，如图 6-14 所示，单击 Apply 按钮，生成如图 6-15 所示的面网格。

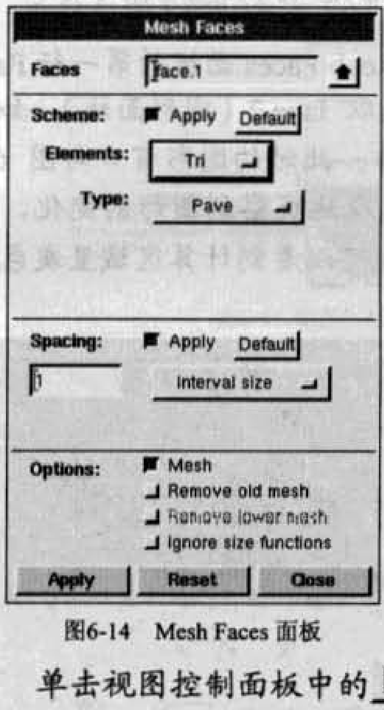


图6-14　Mesh Faces 面板

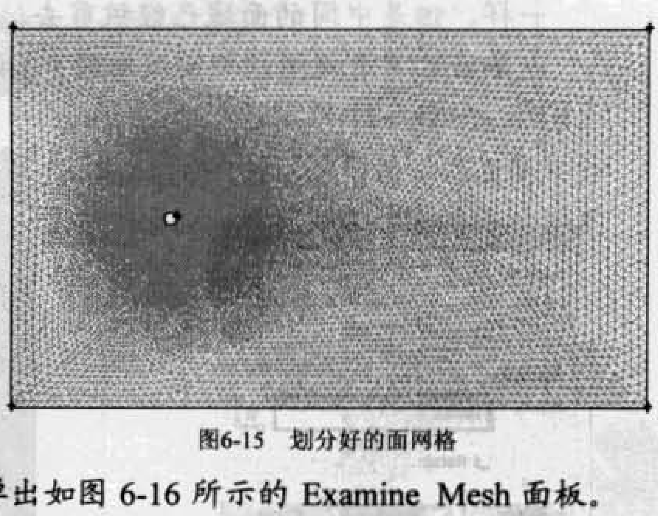


图6-15　划分好的面网格

4. 单击视图控制面板中的[按钮]按钮，弹出如图 6-16 所示的 Examine Mesh 面板。单击面板中的 2D Element 按钮，并按下右侧的三角形网格。当选取 Range 质量值范围选项时，图中显示最左侧的柱体最高，表示划分的体网格质量较好，可以用于下步计算。
5. 网格划分好后定义边界类型，单击[按钮]→[按钮]，在 Specify Boundary Types 面板

中选择矩形左侧入口线段（edge.4），定义为速度入口边界（VELOCITY_INLET），名称为 in; 定义矩形右侧出口线段（edge.2）为自由出口（OUTFLOW），名称为 out; 定义圆柱边界（edge.6）为壁面（WALL），名称为 zhumian; 其余矩形的上下边界不做定义，默认为 WALL 边界。定义好的边界如图 6-17 所示。

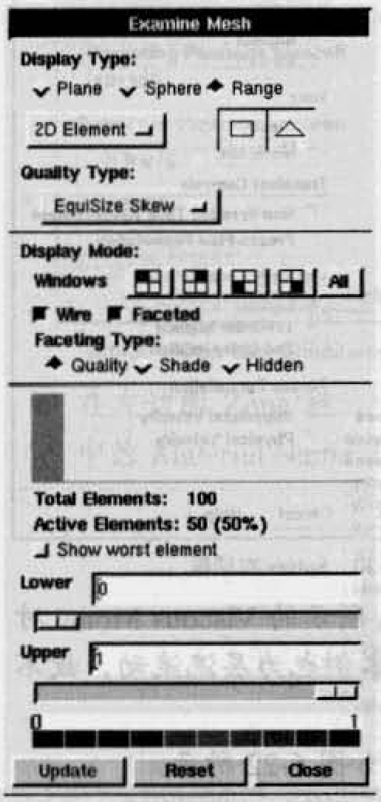


图6-16　网格质量检查

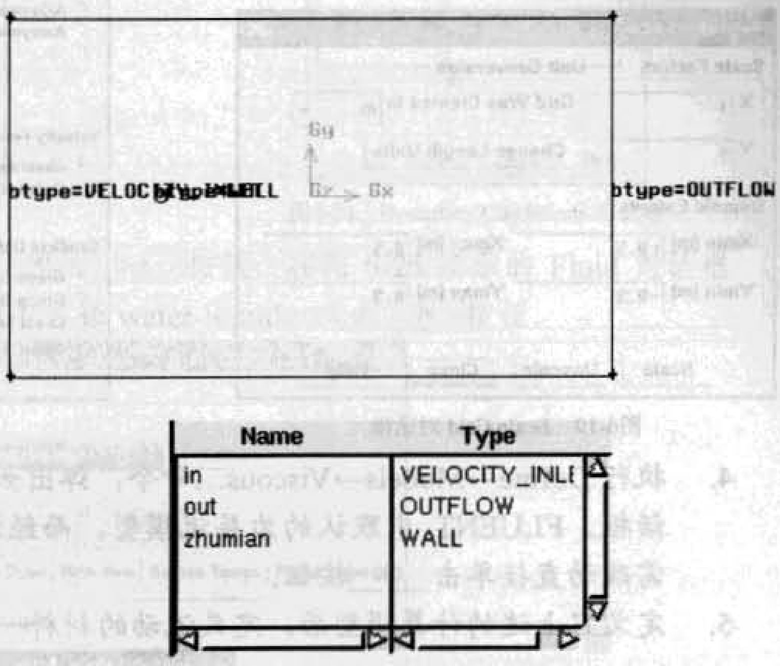


图6-17　定义好的边界类型

6.　最后执行 File→Export→Mesh 命令，将网格输出为 sl6-1.msh。

四、求解计算

1.　启动 FLUENT 二维单精度计算器，执行 File→Read→Case...命令，读入划分好的网格文件 "sl6-1.msh"。网格读入之后，执行 Grid→Check 命令，检查网格的信息，如图 6-18 所示。Domain Extents 显示了计算区域的 x、y 轴范围，Volume Statistics 显示了最小、最大与总体积，Face area statistics 显示了最小和最大面积。

```
Grid Check

 Domain Extents:
   x-coordinate: min (m) = -5.000000e-001, max (m) = 5.000000e-001
   y-coordinate: min (m) = -3.000000e-001, max (m) = 3.000000e-001
 Volume statistics:
   minimum volume (m3): 2.272063e-007
   maximum volume (m3): 1.309872e-004
     total volume (m3): 5.996862e-001
 Face area statistics:
   minimum face area (m2): 5.803275e-004
   maximum face area (m2): 1.860288e-002
```

图6-18　网格检查的信息

2.　执行 Grid→Scale...命令，弹出 Scale Grid 对话框，由于在 GAMBIT 中是按照 m 为单位 1:1 建立的几何模型，本例不需要重新定义网格的尺寸，从图 6-19

所示的对话框中可以看出计算区域的尺寸范围。

3. 执行 Define→Models→Solver...命令，弹出 Solver 对话框，如图 6-20 所示。选中 Time 下方的 Unsteady，启用非定常计算，其余保持默认，单击 OK 按钮。

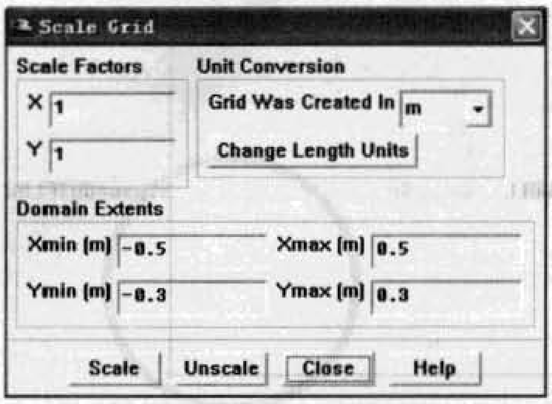


图6-19 Scale Grid 对话框

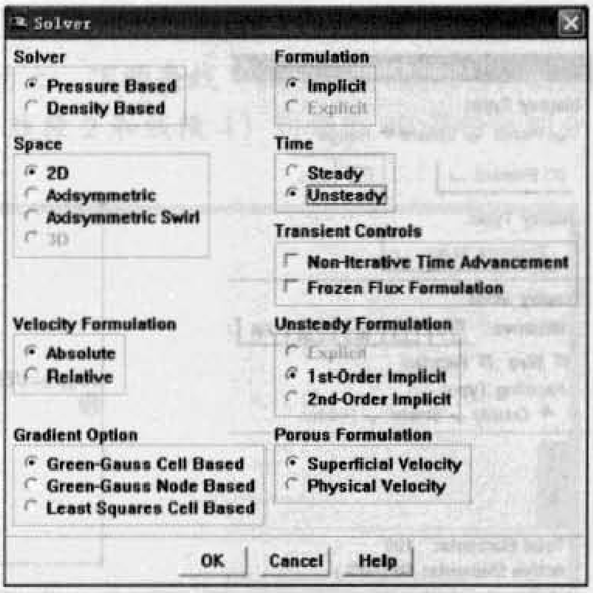


图6-20 Solver 对话框

4. 执行 Define→Models→Viscous...命令，弹出如图 6-21 所示的 Viscous Model 对话框。FLUENT 中默认的为层流模型，而经过计算本例也为层流流动，故不需改动直接单击 OK 按钮。

5. 定义完上述的计算模型后，定义流动的材料——水，如图 6-22 所示。

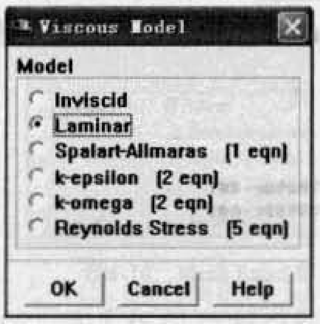


图6-21 Viscous Model 对话框

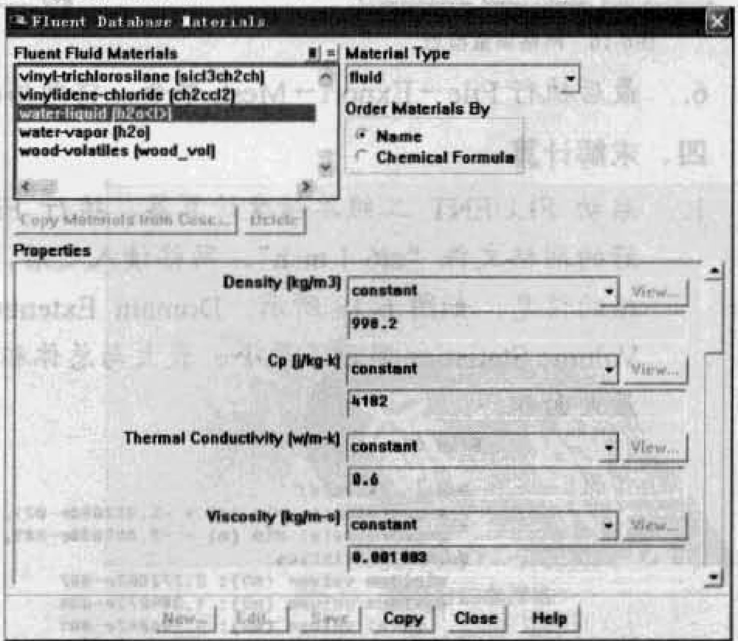


图6-22 Fluent Database Materials 对话框

6. 回到 Materials 对话框，即会发现在 Fluent Fluid Materials 下拉列表中存在了空气和水两种材料，本例选择为水。单击 Materials 对话框中的 Close 按钮，完成材料的定义。

7. 执行 Define→Operating Conditions 命令，打开如图 6-23 所示的 Operating

Conditions 对话框，本例保持默认设置，单击 OK 按钮。

8. 下面定义本例的边界条件。执行 Define→Boundary Conditions...命令，弹出如图 6-24 所示的 Boundary Conditions 对话框，定义如下边界。

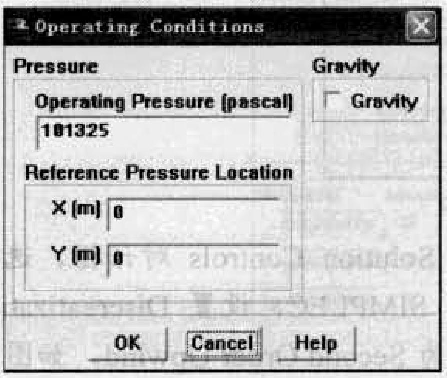


图6-23 Operating Conditions 对话框

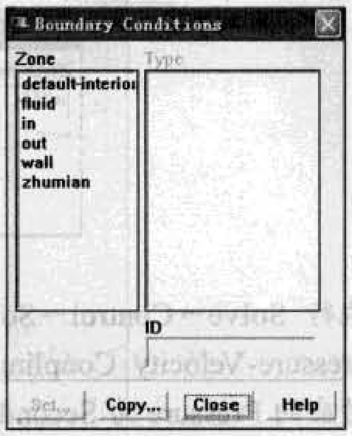


图6-24 Boundary Conditions 对话框

- 在左边的 Zone 栏选中 fluid，单击 Set... 按钮，在图 6-25 所示的 Fluid 对话框中的 Material Name 下拉列表中选择 water-liquid，单击 OK 按钮。

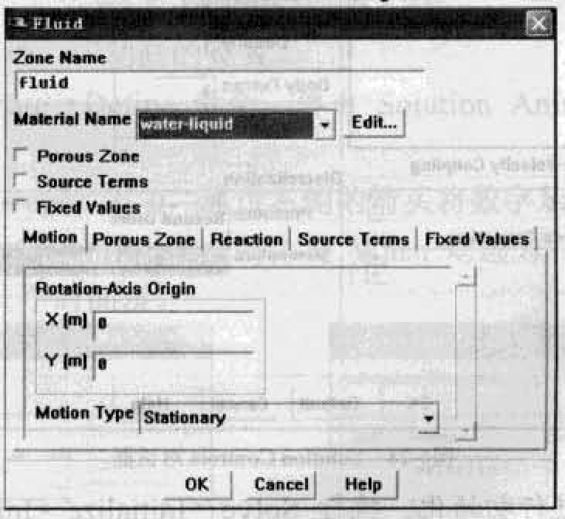


图6-25 Fluid 定义

- 在左边的 Zone 栏选中 in，单击 Set... 按钮，在图 6-26 所示的 Velocity Inlet 对话框中的 Velocity Specification Method 中选择"Magnitude,Normal to Boundary"，表示速度进口方向垂直于入口边界；在 Velocity Magnitude（m/s）中输入 0.01，表示进口速度为 0.01m/s，单击 OK 按钮。

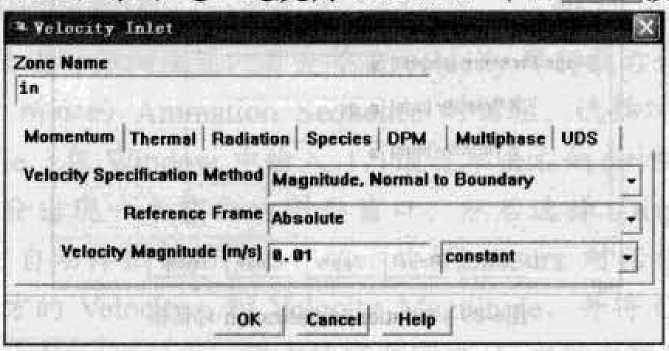


图6-26 速度入口定义

- 在左边的 Zone 栏选中 out，单击 Set... 按钮，弹出如图 6-27 所示的 Outflow

对话框，对话框中的 Flow Rate Weighting 默认为 1，表示进入的水均从该出口流出。保持默认，单击 OK 按钮。定义完边界后，回到 Boundary Conditions 对话框，单击 Close 按钮，关闭该对话框。

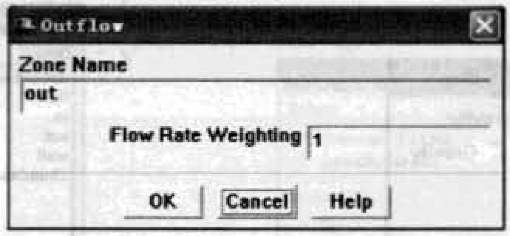


图6-27　Outflow 出口定义

9. 执行 Solve→Control→Solution...命令，打开 Solution Controls 对话框，选择 Pressure-Velocity Coupling 对应的求解方式为 SIMPLEC，设置 Discreatization 对应的 Pressure 为 Second Order，Momentum 为 Second Order Upwind，如图 6-28 所示，单击 OK 按钮。

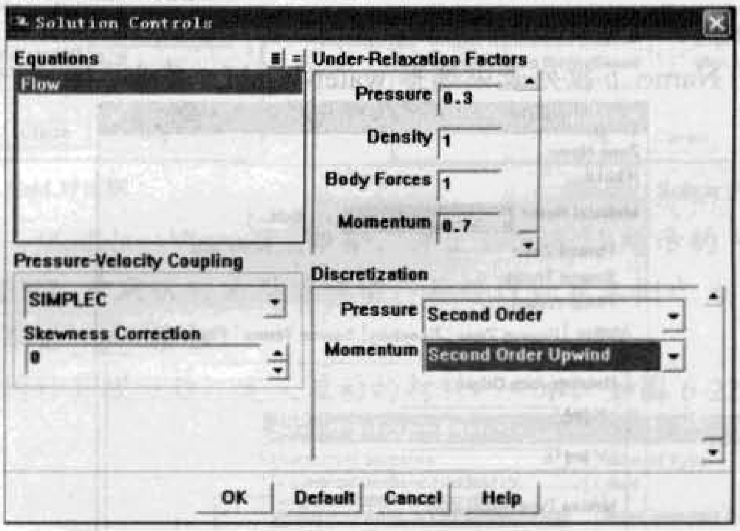


图6-28　Solution Controls 对话框

10. 接下来，对流场进行初始化。执行 Solve→Initialize→Initialize...命令，在弹出的如图 6-29 所示的 Solution Initialization 对话框中选择 in，顺序单击 Init、Apply、Close 按钮。

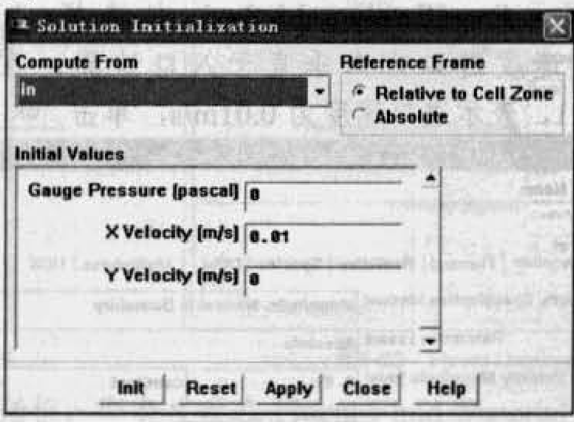


图6-29　Solution Initialization 对话框

11. 初始化后，执行 Solve→Monitors→Residual...命令，在弹出的 Residual Monitors 对话框中选中 Plot，以打开残差曲线图，FLUENT 默认的各参数的收

敛精度为 0.001，本例将各参数收敛标准均改为 0.00001，如图 6-30 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

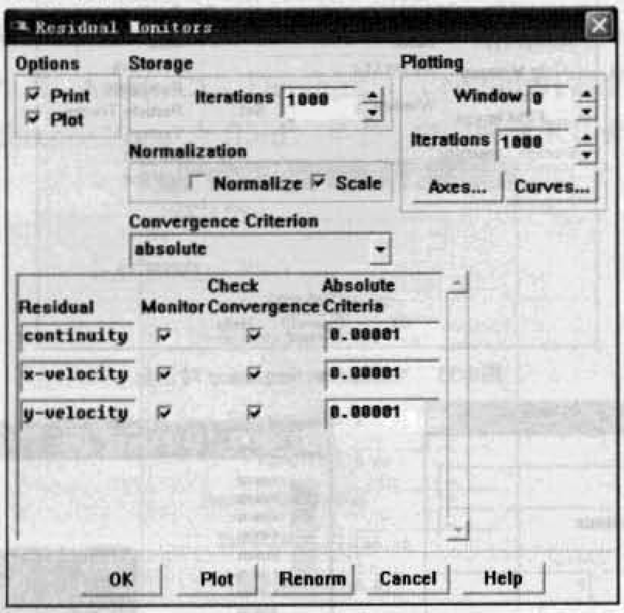


图6-30 Residual Monitors 对话框

下面介绍本例的特色之处，即动画的设置。

12. 执行 Solve→Animate→Define 命令，弹出 Solution Animation 对话框，如图 6-31 所示。

此时的 Animation Sequences 为 0，通过右侧的箭头将数字从 0 调成 2。如图 6-32 所示，在 Name 栏分别输入 velocity 和 vorticity，将 When 均选为 Time Step，保持 Every 为 1，即每一帧的录像时间为一个时间步。

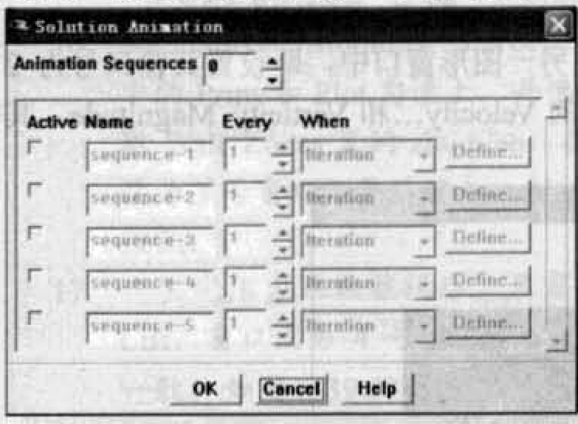


图6-31 Solution Animation 对话框

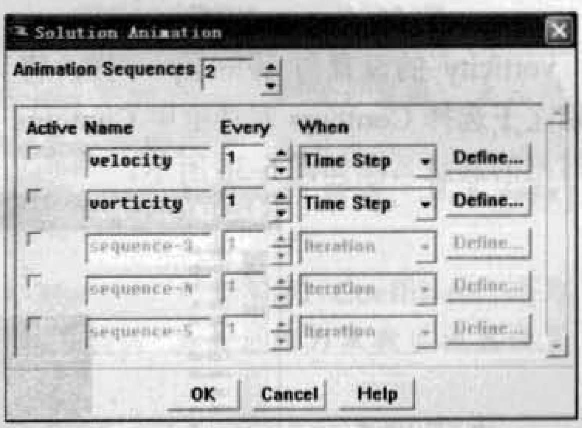


图6-32 动画个数设置

13. 下面需要对动画进行详细设置，首先单击 velocity 那行最右侧的 Define... 按钮，弹出如图 6-33 所示的 Animation Sequence 对话框。选择对话框中的 Storage Type 为 Metafile，在 Window 中输入 1，通过单击右侧 Set 按钮使对应的 id 窗口生效，此时会出现一个空白的图形窗口。然后选择 Display Type 下方的 Contours，这时自动弹出如图 6-34 所示的 Contours 对话框；选择对话框中 Contours of 下方的 Velocity...和 Velocity Magnitude，并将 Options 中的 Filled 勾选上，单击 Display 按钮后，刚才的空白窗口 1 中即出现了初始时刻的速度云图，如图 6-35 所示。单击 Close 按钮关闭 Contours 对话框，回到 Animation

Sequence 对话框中单击 OK 按钮。

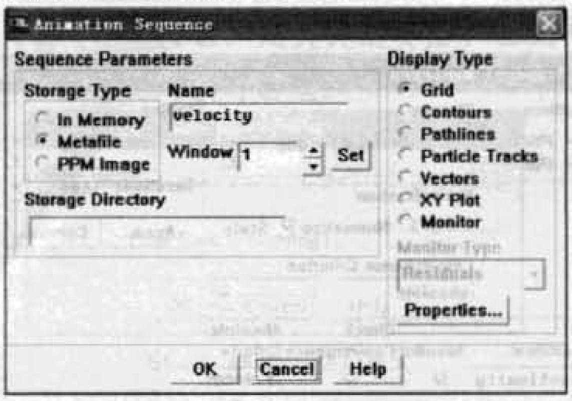


图6-33　Animation Sequence 对话框



图6-34　Contours 对话框

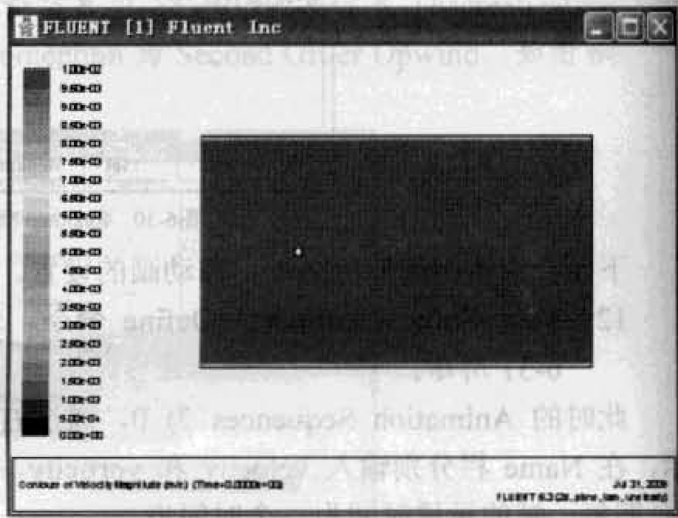


图6-35　初始时刻的速度场

vorticity 的设置与 velocity 一样，将其显示在另一图形窗口中，即设置其窗口号为 2。区别在于选择 Contours 对话框中 Contours of 下方的 Velocity...和 Vorticity Magnitude，其初始时刻的涡量云图如图 6-36 所示。

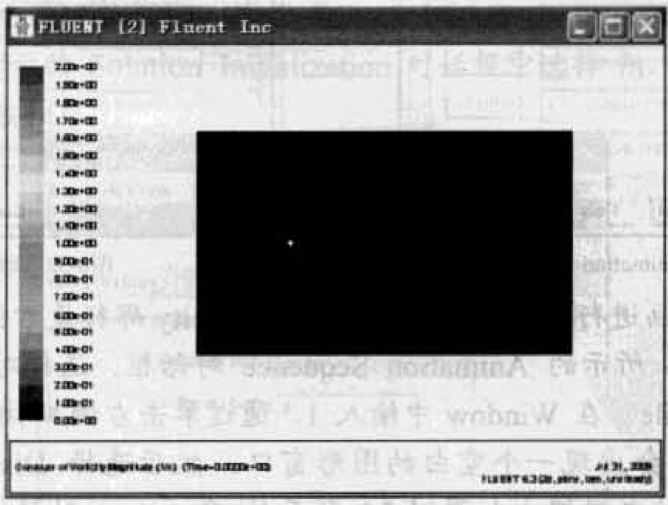


图6-36　初始时刻的涡量云图

注意：Storage Type 是 FLUENT 动画保存的方式，其中 Metafile 为将动画一帧帧地保存在硬盘中，随时可以读取。

14. 回到 Solution Animation 对话框，单击 OK 按钮，完成动画录制的设置。

15. 接下来设置升力与阻力系数监视器，为确保其精确性，在这之前首先需要设置参考值。执行 Report→Reference Values...命令，在 Compute From 下拉列表中选择 in，并在 Area[m2]、Depth[m]、Length[m]右侧均输入圆柱的直径 0.02，保持 Reference Zone 为 fluid，单击 OK 按钮 K，如图 6-37 所示。

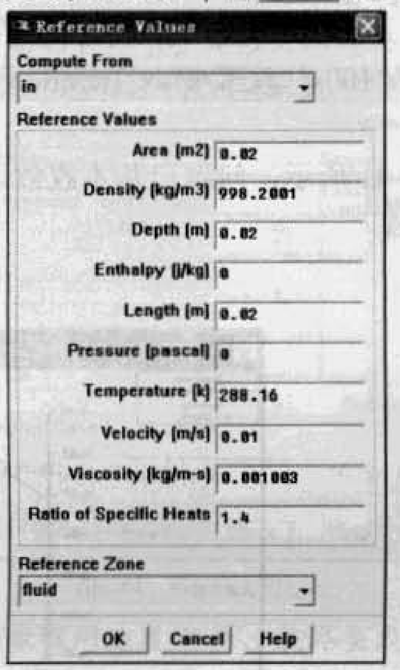


图6-37 参考值设置

注意：Area[m2]同样设置为 0.02m²，这是因为本例为二维流动，对于来流的迎流面积可认为与直径一致。

16. 执行 Solve→Monitors→Force...命令，弹出 Force Monitors 对话框，将 Options 中的 Print 和 Plot 勾选上，并选择 Coefficient 中的 Drag，即阻力系数；之后选取 Wall Zones 里的 zhumian，在 Plot Window 中输入 3，将阻力系数监视窗口设为 3 号窗口；最后将 File Name 设为 cd-history，如图 6-38 所示，单击 Apply 按钮。

17. 设置完阻力系数监视后，只需将 Force Monitors 对话框的 Coefficient 选为 Lift，窗口设为 4 号，File Name 设为 cl-history，其余与阻力系数监视器设置一致，如图 6-39 所示，单击 Apply 按钮。

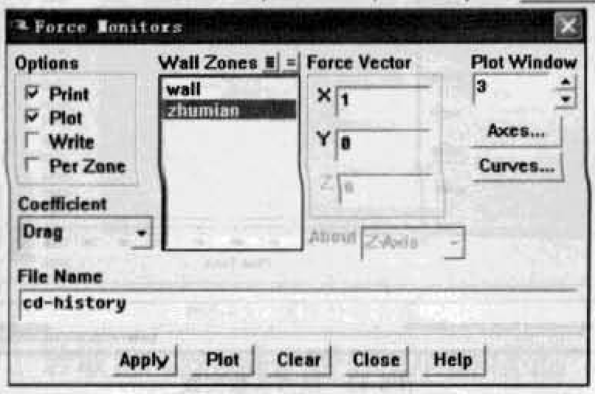


图6-38 阻力系数监视器设置

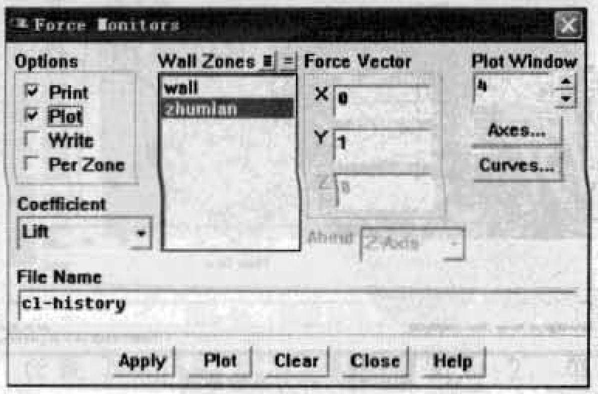


图6-39 升力系数监视器设置

18. 此时即完成了升力与阻力系数监视的设置，单击 Close 按钮关闭 Force Monitors 对话框。

19. 完成上述步骤的设置后，执行 File→Write→Case...命令，将工程文件保存为 sl6-1.cas。

20. 执行 olve→Iterate...命令，弹出如图 6-40 所示的 Iterate 对话框；其中的 Time Step Size 为时间步长，设置为 0.1s，Number of Time Steps 为时间步数；设置为 1000，即迭代时间为 100s；设置 Max Iterations per Time Step 为 30，单击 Iterate 按钮开始解算。

迭代完后的残差曲线如图 6-41 所示，问题已基本收敛。

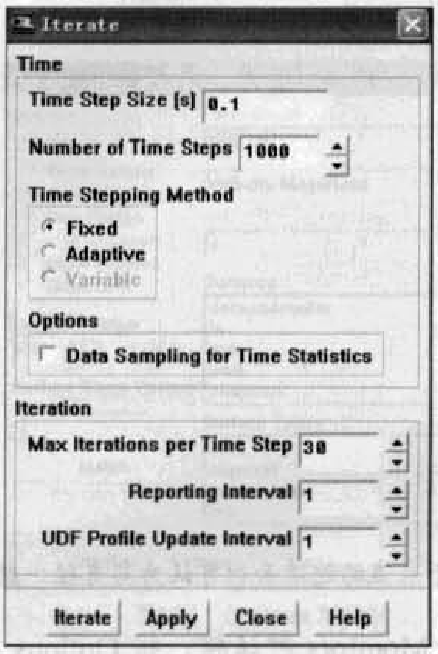


图6-40　Iterate 对话框

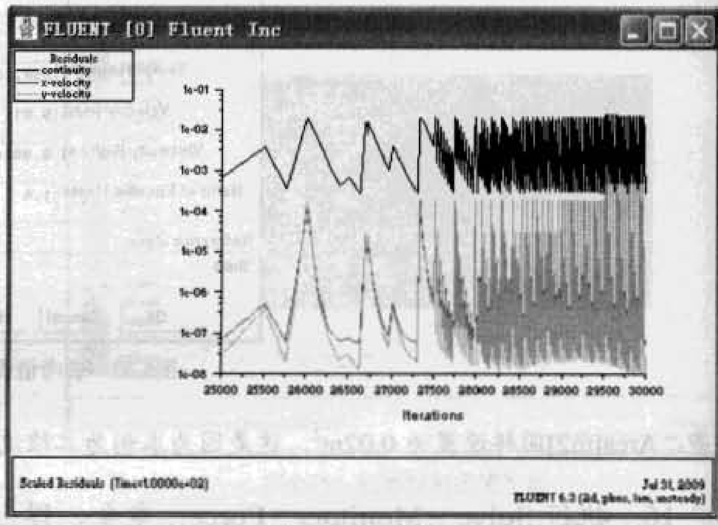


图6-41　残差曲线

注意：Max Iterations per Time Step 也可设置得再长一些，当设置一定值时，可以保证每步迭代都能达到收敛。

升力与阻力系数如图 6-42 和图 6-43 所示，两条曲线均呈现出周期性的变化。

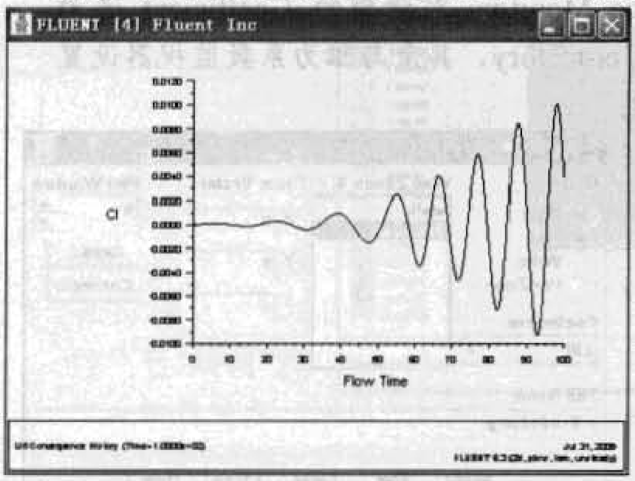


图6-42　升力系数曲线

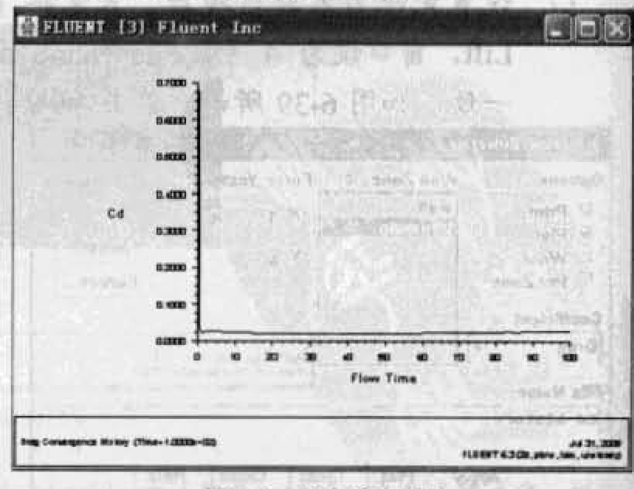


图6-43　阻力系数曲线

21. 执行 Solve→Animate→Playback 命令，打开如图 6-44 所示的动画回放对话框

（Playback 对话框）；选择 Playback Mode 右侧下拉列表中的 Play Once，即回放一次。首先选中 velocity，保持 Start Frame 为 1，Increment 为 1，End Frame 为 1000，即从第一帧开始回放直至第一千帧。拖曳 Replay Speed 的滚动条可以控制动画回放的速度。最后在 Write/Record Format（保存格式）中选择 Hardcopy Frames，单击 Write 按钮。此时可以看到窗口 1 中的速度动画开始重新播放，播放的同时，动画将以 jpg 的形式保存每帧图片在工作目录下。

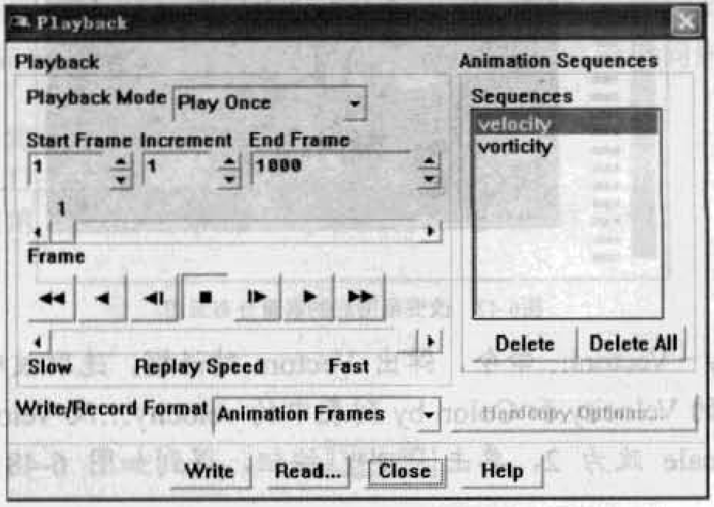


图6-44　Playback 对话框

22. 涡量动画的回放与保存步骤同速度动画，最终生成每帧的 jpg 文件。
23. 将生成的速度与涡量的每帧图片分别保存在新建文件夹下，然后以文件夹的形式导入 Adobe ImageReady 进行动画处理，生成动画文件 velocity.gif 和 vorticity.gif，并保存于当前工作目录下。
24. 执行 Display→Contours...命令，在 Contours 对话框中选择 Contours of 下拉列表中的 Velocity...和 Velocity Magnitude，并选中 Options 选择栏中的 Filled，单击 Display 按钮，得到 100s 后的速度分布云图，如图 6-45 所示。
25. 改变 Contours of 下拉列表选项为 Velocity...和 Vorticity Magnitude，再次单击 Display 按钮，得到 100s 后的涡量分布云图，如图 6-46 所示。

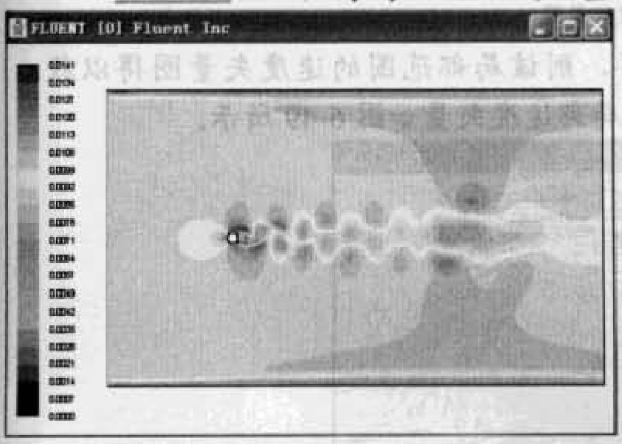


图6-45　速度分布云图

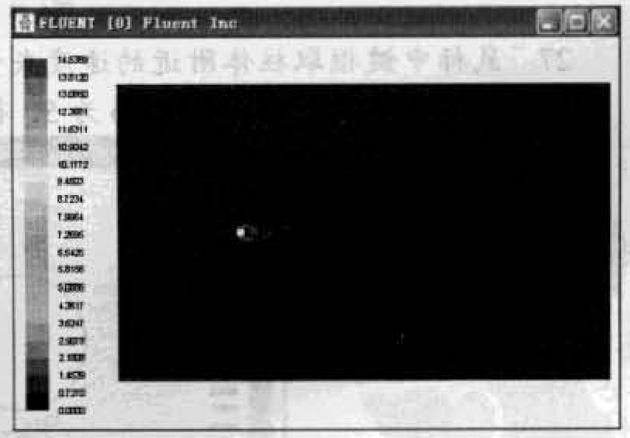


图6-46　涡量分布云图

若取消 Contours 对话框中的 Auto Range，设置 Min[1/s]为 0，Max[1/s]为 2，单击 Display 按钮，则得到涡量值在 0～2 范围内的涡量分布云图，如图 6-47 所示。由此可见，缩小涡量值范围的显示区间，可以更加清晰地看到圆柱体后的漩涡脱落情况。

注意： 云图显示时，在默认的区间内若不能清晰地观察到物理参数的变化，则需要合理地设置显示区间的范围。



图6-47　改变范围后的涡量分布云图

26. 执行 Display→Vectors...命令，弹出 Vectors 对话框，选取该对话框 Vectors of 下方列表中的 Velocity 和 Color by 列表中的 velocity...及 Velocity Magnitude，将左侧的 Scale 改为 2，单击 Display 按钮，得到如图 6-48 所示的速度矢量图。

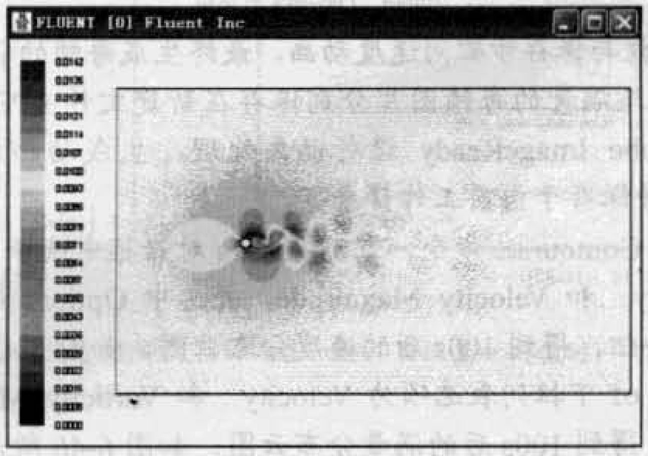


图6-48　速度矢量图

27. 鼠标中键框取柱体附近的速度矢量图，则该局部范围的速度矢量图得以放大，改变 Scale 为 3 及 Skip 为 5，得到局部速度矢量如图 6-49 所示。

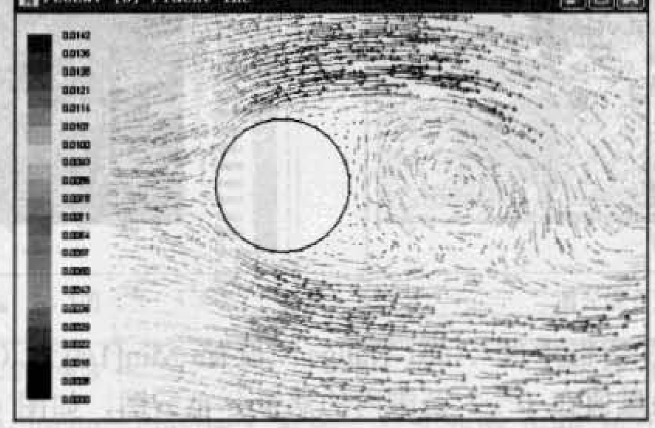


图6-49　速度矢量图局部放大显示

28. 执行 File→Write→Data...命令，将计算结果保存为 sl6-1.dat 文件。最后执行 File→Exit 命令，安全退出 FLUENT。

6.3 本章小结

本章主要讲述了非定常流动问题的概念及 FLUENT 求解非定常流动问题的过程，通过典型实例——圆柱绕流分析的介绍，帮助读者掌握非定常流动问题的分析思路，了解 FLUENT 求解非定常问题的过程，为研究实际工程中的非定常流动问题打下基础。

备忘录

- 非定常流动的概念。
- FLUENT 中启动非定常计算的设置。
- 利用 FLUENT 求解非定常流动问题的操作过程。

第 7 章 多相流模型

物质具有气态、液态和固态三相，自然界和工程中很多问题都涉及到多相流动。多相流是在流体力学、传热传质学、物理化学、燃烧学等学科的基础上发展起来的一门新兴学科，其“相”定义为具有相同类型的物质，该类物质在所处的流动中具有特定的惯性响应并与流场相互作用。多相流体力学具有非常强的工业应用背景，已广泛应用于石油、化工、能源、动力、冶金、环保、航天等国民经济生产的各部门。

多相流可以分为气液流动、气固流动、液液流动、液固流动及三相流动。如空气泵、气穴、蒸发的气泡流、喷雾、干燥机、气冷的液滴流、旋风分离器的粒子负载流等都属于多相流动。

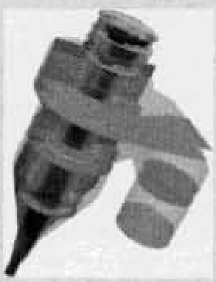
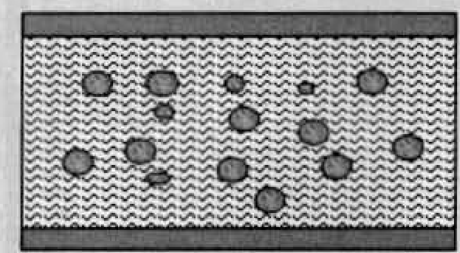
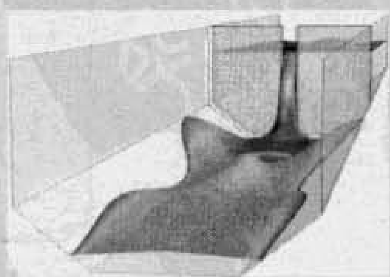
本章将重点介绍常见的几种多相流模型，并用三个实例来介绍 VOF 模型、Mixture 模型、Euler 模型在工程实际中的应用，帮助读者熟悉 FLUENT 模拟多相流动的方法。

本章要点

- VOF 模型。
- Mixture 模型。
- Euler 模型。
- 多相流模型的选择与设置。
- 多相流动模拟操作实例。

本章案例

- 敞口旋转容器内流体流动模拟。
- 二维溃坝过程流动模拟。
- 油水两相流弯管流动模拟。

7.1 VOF 模型

VOF 模型是一种在固定的欧拉网格下的表面跟踪方法，通过求解单独的动量方程和处理穿过区域的每一流体的体积分数来模拟两种或三种不能混合的流体。当需要得到一种或多种互不相融流体间的交界面时，可以采用这种模型。典型的应用例子包括分层流、射流破碎、流体中的大泡运动、自由表面流动等。

7.1.1 VOF 模型的局限

在 FLUENT 中使用 VOF 模型具有如下限制：

- VOF 模型只能采用压力基求解器；
- 所有的控制体积必须充满单一流体相或者相的联合，VOF 模型不允许在空的区域中没有任何类型的流体存在；
- VOF 模型中只有一相允许被定义为可压缩理想气体，但是不限制使用 UDF 定义可压缩液体相；
- 周期性流动问题不能和 VOF 模型同时计算；
- 二阶隐式的时间格式不能用于 VOF 模型；
- 组分混合和反应流动问题不能和 VOF 模型同时计算；
- 大涡模拟湍流模型不能用于 VOF 模型；
- VOF 模型不能用于并行计算中追踪粒子；
- 无粘流动不能使用 VOF 模型；
- 壁面壳传导模型不能和 VOF 模型同时计算。

另外，VOF 模型通常用于计算时间依赖解，即瞬态问题。但是对于只关心稳态解的问题，如求解不依赖初始条件并且各相有明显的流入边界的问题，它可以执行稳态计算。例如，槽道顶部有空气的水的流动与分离的空气入口可以采用稳态公式计算，而旋转杯子中的自由表面形状依赖流体的初始水平，就必须采用非定常计算。

7.1.2 VOF 模型的设置

在 FLUENT 中，执行 Define→Models→Multiphase 命令，弹出如图 7-1 所示的 Multiphase Model 对话框，FLUENT 默认的选择为 Off（即不启用多相流模型）。由图可见，Model 下方剩下的 3 个选项分别对应着 VOF、Mixture、Eulerian 模型。



图7-1　多相流模型选择对话框

当选择 Volume of Fluid 选项时，即启用了 VOF 模型，如图 7-2 所示。其中 VOF Parameters 下的 VOF Scheme 可选择显式和隐式。当选择显式时，需要输入适当的 Courant 数，FLUENT 默认的是 0.25。在 Number of Phases 中可以指定多相流模型计算的相数，最多为 20 相。选择 Open Channel Flow 表示问题为明渠流。涉及体积力计算时，还需要选中 Implicit Body Force，通过解决压力梯度和动量方程中体积力的部分平衡提高了解的收敛。

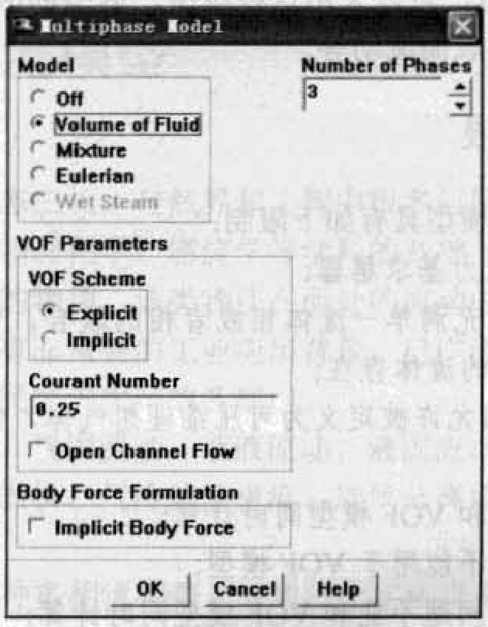


图7-2 选择 VOF 模型

7.2 Mixture 模型

混合模型（Mixture 模型）是一种简化的多相流模型，可用于模拟两相或多相具有不同速度的流动（流体或颗粒）。混合模型主要实现求解混合相的连续性方程、动量方程、能量方程、第二相的体积分数及相对速度方程等功能。典型的应用包括低质量载荷的粒子负载流、气泡流、沉降以及旋风分离器等。混合模型也可以用于没有离散相相对速度的均匀多相流。

7.2.1 Mixture 模型的局限

在 FLUENT 中使用 Mixture 模型具有如下限制：

- 混合模型只能用于压力基求解器；
- 只有一相允许被定义为可压缩理想气体，但是不限制使用 UDF 定义可压缩液体相；
- 不能用于求解周期性流动；
- 不能用于模拟凝固和融化过程；
- 无粘流动不能使用 Mixture 模型；
- 在模拟气穴现象时，若湍流模型为 LES 模拟则不能使用 Mixture 模型；
- 在 MRF 多旋转坐标系与混合模型同时使用时，不能使用相对速度公式；
- 不能和固体壁面的热传导模拟同时使用；

- 不能用于并行计算和颗粒轨道模型；
- 组分混合和反应流动问题不能和混合模型同时计算；
- 二阶隐式时间步算法不能采用混合模型。

混合模型和 VOF 模型的相同之处在于它们都是一种“单流体”模型，即只求解一套动量、能量方程，不同之处在于：

- 混合模型允许相间穿插，即在同一控制体内各相体积分数可以是 0 到 1 之间的任意数，总和为 1；
- 相间允许有速度滑移。

7.2.2 Mixture 模型的设置

在 Multiphase Model 对话框中选择 Mixture，如图 7-3 所示。其中 Mixture Parameters 下方的 Slip Velocity 为滑移速度，若选中则考虑相间滑移，若不选则相间速度一致。其余的 Number of Phases 和 Implicit Body Force 选择同 VOF 模型。

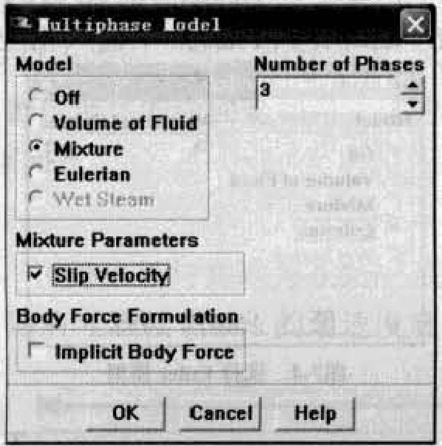


图7-3 选择混合模型

7.3 Euler 模型

欧拉模型可以模拟多相流动及相间的相互作用。相可以是气体、液体、固体的任意组合。每一相都采用 Eulerian 处理。采用欧拉模型时，第二相的数量仅仅因为内存要求和收敛行为而受到限制，只要有足够的内存，任意多个第二相都可以模拟。然而，对于复杂的多相流流动，解会受到收敛性的限制。

欧拉多相流模型没有液—液、液—固的差别。颗粒流是一种简单的流动，至少涉及有一相被指定为颗粒相。

7.3.1 Euler 模型的局限

在 FLUENT 中使用 Euler 模型具有如下限制：

- 不能对各相使用雷诺应力湍流模型；
- 不能用于求解周期性流动；
- 不能用于模拟凝固和融化过程；

- 无粘流动不能使用 Euler 模型；
- 不能用于并行计算和颗粒轨道模型；
- 不允许存在压缩流动；
- 颗粒跟踪仅与主相相互作用；
- 模型中不能考虑热传输；
- 相间的质量传输仅允许在气穴问题中，而在蒸发和压缩中是不可行的；
- 二阶隐式时间步算法不能采用欧拉模型。

FLUENT 中的欧拉模型中各相共享单一的压力场，对每一相都求解动量和连续性方程。颗粒相才可以根据颗粒动力学理论计算颗粒拟温度、粒子相剪切和体积粘性、摩擦粘性。

7.3.2 Euler 模型的设置

在 Multiphase Model 对话框中选择 Euler，如图 7-4 所示。欧拉模型选择相对简单，只需要读者定义模拟的相数，即在 Number of Phases 中输入相应的相数。

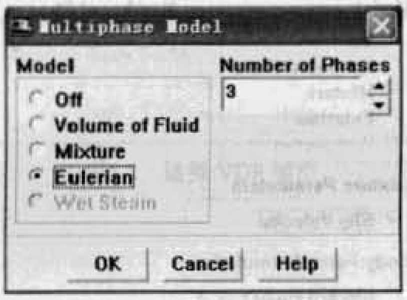


图7-4　选择 Euler 模型

7.4 多相流模型的选择与设置

7.4.1 多相流模型选择的基本原则

通常，先决定采用何种最能符合实际流动的模式，然后根据以下原则来挑选最佳的模型，包括如何选择含有气泡、液滴和粒子的流动模型：

- 对于体积分数小于 10%的气泡、液滴和粒子负载流动，采用离散相模型；
- 对于离散相混合物或者单独的离散相体积率超出 10%的气泡、液滴和粒子负载流动，采用混合模型或者欧拉模型；
- 对于栓塞流、泡状流，采用 VOF 模型；
- 对于分层/自由面流动，采用 VOF 模型；
- 对于气动输运，如果是均匀流动，则采用混合模型；如果是粒子流，则采用欧拉模型；
- 对于流化床，采用欧拉模型模拟粒子流；
- 对于泥浆流和水力输运，采用混合模型或欧拉模型；
- 对于沉降，采用欧拉模型；

- 对于更加一般的，同时包含若干种多相流模式的情况，应根据最感兴趣的流动特征，选择合适的流动模型。此时由于模型只是对部分流动特征做了较好的模拟，其精度必然低于只包含单个模式的流动。

7.4.2 混合模型和欧拉模型的选择细则

混合模型和欧拉模型都适用于流动中有相混合或分离，或者分散相的体积分数超过10%的情形。然而，两者并不等同，在选择时要考虑以下细则：

- 若分散相分布较广，最好选择混合模型；分布较窄时，可以使用欧拉模型；
- 若相间曳力规律已知，欧拉模型比混合模型更精确；若相间曳力规律不清晰，此时混合模型可能是更好的选择；
- 若希望计算量小，最好选择混合模型，因为它比欧拉模型要少解一部分方程；如果希望计算精度高，则欧拉模型是更好的选择。

【实例 7-1】：敞口旋转容器内流体流动模拟

敞口旋转容器内的液体具有自由液面，在一定转速下，容器内部液面会出现下凹。那么，原本静止的容器旋转后，容器内液体的液面是如何变化的？这是我们所关心的问题，下面我们就利用 VOF 模型来求解该问题。

一、实例概述

图 7-5 所示为敞口旋转容器，顶部半径与高均为 0.5m，底部半径为 0.3m，其中装有 2/5 的水。初始时刻水为静止状态，随后容器以 2rad/s 的角速度旋转。

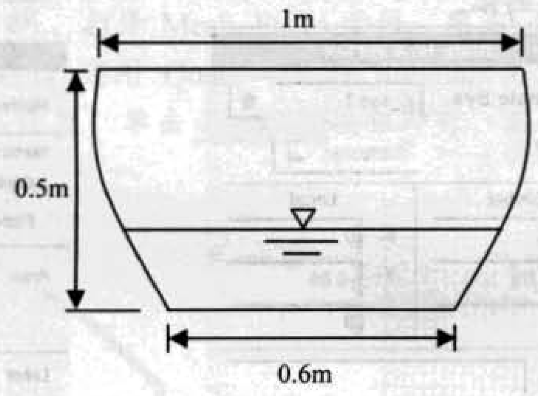


图7-5 敞口旋转容器示意图

思路分析

本例为二维轴对称问题，计算区域可以取容器的一半。由于 FLUENT 规定轴的方向必须与 x 轴一致，因此建模时建立容器的右半区域，待导入 FLUENT 后再镜像与旋转。

通过本实例的演示过程，读者将学习到：

- 圆弧绘制；
- 轴对称模型的建立；
- 旋转；
- 镜像；

- VOF 模型选择；
- 定义流体相；
- 初始化区域；
- 查看体积分数图。

结果文件——参见附带光盘“Ch7\sl7-1.msh”、“Ch7\sl7-1.dbs”、“Ch7\sl7-1.jou”、“Ch7\sl7-1.trn”、“Ch7\sl7-1.cas”、“Ch7\sl7-1-0.4s.dat”、“Ch7\sl7-1-0.6s.dat”、“Ch7\sl7-1-1s.dat”。

动画演示——参见附带光盘“Ch7\AVI\sl7-1.avi”。

二、模型建立

1. 双击 GAMBIT 的桌面快捷方式，启动 GAMBIT。
2. 单击 → → ，在 Create Real Vertex 面板的 x、y、z 坐标输入栏中输入（0，0，0），单击 Apply 按钮生成第一个点，随后按同样方法依次建立点（0.5，0，0）、点（0，0.5，0）和点（0.5，0.3，0），这是容器右半区域的 4 个点。由于容器的一条边为圆弧，所以还需要建立一个圆心，通过计算，圆弧的圆心为（0，-0.09，0），最后绘制好的 5 个点如图 7-6 所示。
3. 下面首先连接圆弧，单击 → → ，弹出如图 7-7 所示的 Create Circular Arc 面板，选择第一个 Method，并在 Center 中选择（0，-0.09，0），在 End-Points 中选择（0，0.5，0）与（0.5，0.3，0），保持 Arc 为第一个选项，单击 Apply 按钮生成圆弧。

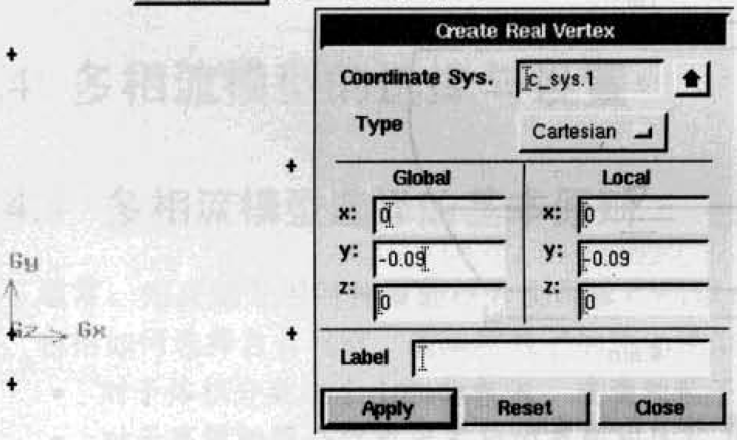


图7-6 点的绘制

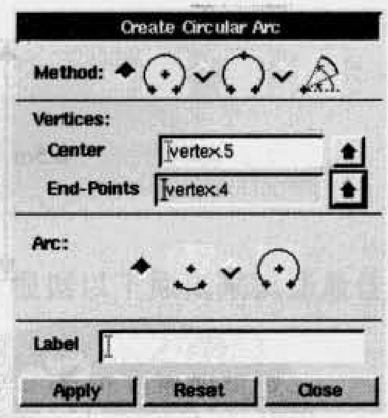


图7-7 Create Circular Arc 面板

4. 单击 → → ，在 Create Straight Edge 面板中选择点 1（Vertix.1）与点 2（Vertix.2），连接这两点生成线段，然后依次建立点 1 与点 3、点 2 与点 4 间的线段，共 3 条线段，如图 7-8 所示。
5. 此时，圆心点已不再需要，单击 Vertex 面板下方的 ，在 Delete Vertices 面板中选择圆心点（0，-0.09，0），即 vertex.5，单击 Apply 按钮删除圆心点，如图 7-9 所示。
6. 单击 → → ，在 Create Face from Wireframe 面板中利用 Shift+鼠标

左键框选容器右半部分的 4 条边，然后单击 Apply 按钮创建面，如图 7-10 所示。

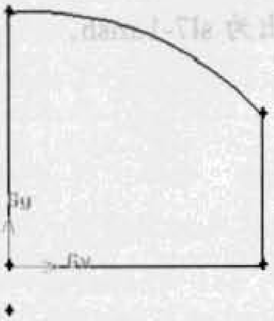


图7-8　绘制线

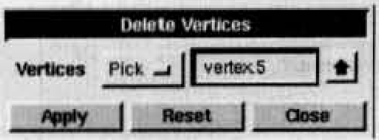


图7-9　删除圆心点

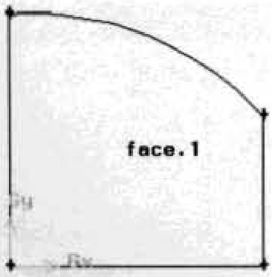


图7-10　创建的面

至此，本例的几何模型已建立好，下步将进行网格划分。

三、网格划分

1. 单击→→，在 Mesh Edges 面板的 Edges 黄色输入栏中选中线段 3 和线段 4（edge.3 和 edge.4），设置 Ratio 的节点距离比例为 1（等间距），选择 Interval count 分段方式，并在左侧输入栏中输入 40，单击 Apply 按钮生成容器右半部分上下边的线网格。按照同样的方法，将线段 1 和线段 2 也划分成等间距的线网格，只不过 Interval count 为 50，得出的线网格如图 7-11 所示。

注意：由于容器右半区域上下半径不一，呈现递减，故线网格可以采用等间距划分，最终仍体现出渐变的网格分布。

2. 单击→→，打开 Mesh Faces 面板，用 Shift+鼠标左键选中已经完成线网格划分的面 1，运用 Quad 单元与 Submap 方法对该面进行面网格划分，保留其他默认设置，单击 Apply 按钮即可，其网格生成如图 7-12 所示。

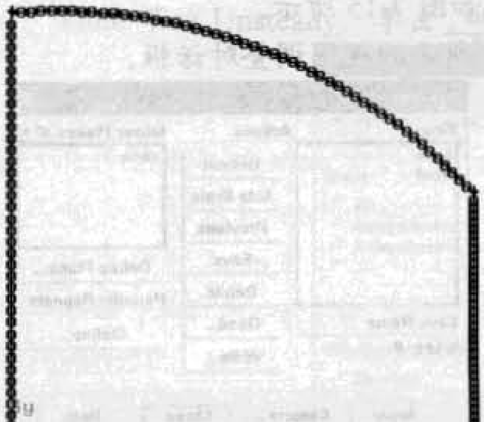


图7-11　线网格的划分

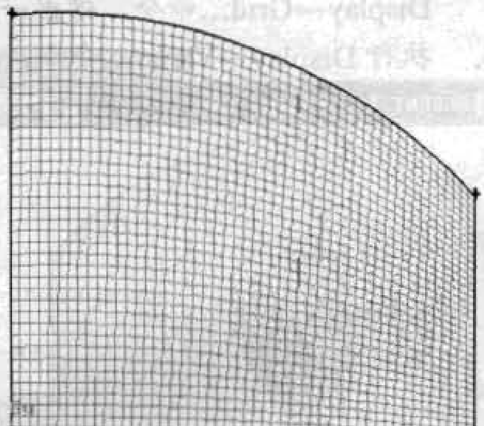


图7-12　面网格的划分

3. 面网格划分好后，需要定义边界类型。单击→，在 Specify Boundary Types 面板中将圆弧边和底边定义为壁面边界（WALL），名称分别为 youcebian 和 dibian，将 x 轴上的中线定义为轴边界（AXIS），名称为 zhou，

将容器开口边定义为压力入口（PRESSURE_INLET），名称为 shangbian，如图 7-13 所示。

4. 网格划分完后，执行 File→Export→Mesh 命令，将网格输出为 sl7-1.msh。

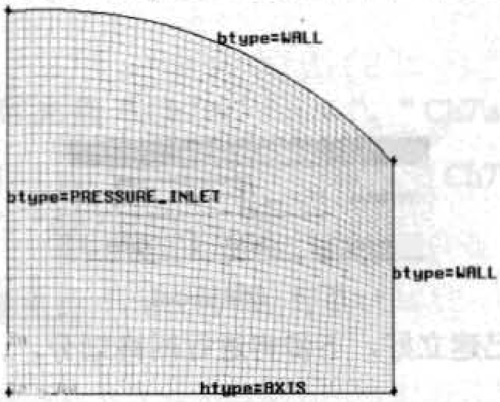


图7-13 边界类型定义

四、求解计算

1. 启动 FLUENT 二维单精度计算器，执行 File→Read→Case...命令，读入划分好的网格文件"sl7-1.msh"。此时，窗口中出现如图 7-14 所示的警告信息，提示用户有轴边界条件，需要修改相应的求解器设置，暂且不管。

```
Warning: The use of axis boundary conditions is not appropriate for
         a 2D/3D flow problem. Please consider changing the zone
         type to symmetry or wall, or the problem to axisymmetric.
```

图7-14 警告信息

2. 执行 Grid→Check 命令，对网格进行检测，成功检测后窗口界面中最后一行出现"Done"语句。执行 Grid→Scale...命令，设置计算区域的尺寸和单位制定义。由于本例模型在 GAMBIT 中是按 m 生成的，故保持默认设置即可，直接单击 Close 按钮关闭 Scale Grid 对话框。
3. 下面调整网格的显示，使其显示为全容器的计算区域。首先显示网格，执行 Display→Grid...命令，弹出一个图形窗口，如图 7-15 所示。
4. 执行 Display→Views...命令，打开如图 7-16 所示的视图调整对话框。

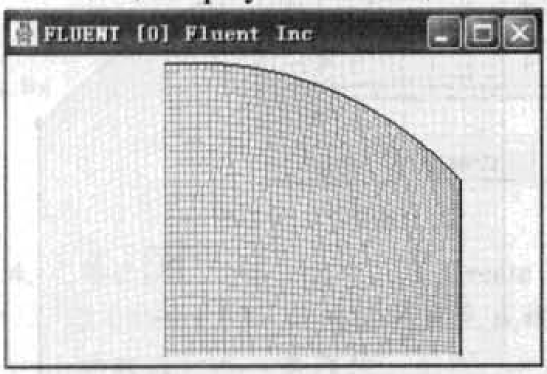


图7-15 网格的显示

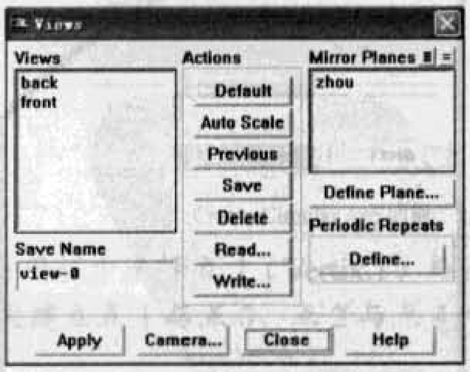


图7-16 Views 对话框

5. 从镜像平面 Mirror Planes 列表中选择 zhou，单击 Apply 按钮，此时先前的图形窗口中显示为整个容器的计算区域，如图 7-17 所示。

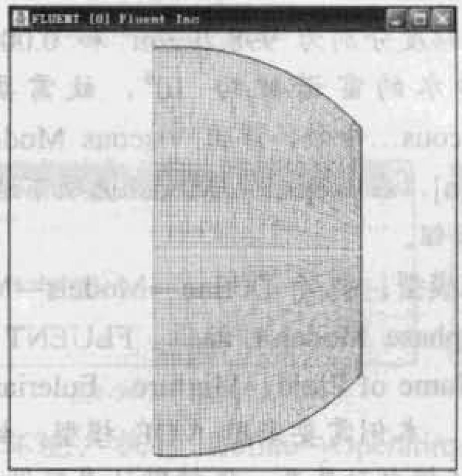


图7-17　全区域显示

6. 单击 Views 对话框中的 Camera... 按钮，打开如图 7-18 所示的 Camera Parameters（照相机参数）对话框，用鼠标调整对话框中的表盘的指针，顺时针方向转动，同时观察视图窗口中的容器，在转动 90° 时停止，呈现出如图 7-19 所示的网格图。最后单击两次 Close 按钮关闭 Camera Parameters 对话框和 Views 对话框。

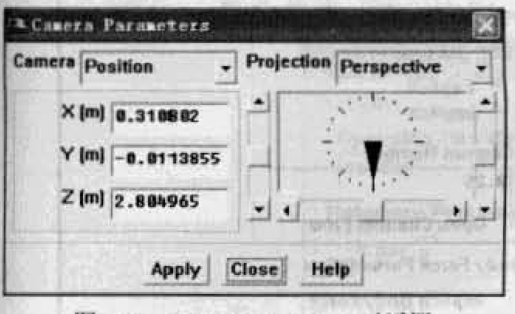


图7-18　Camera Parameters 对话框

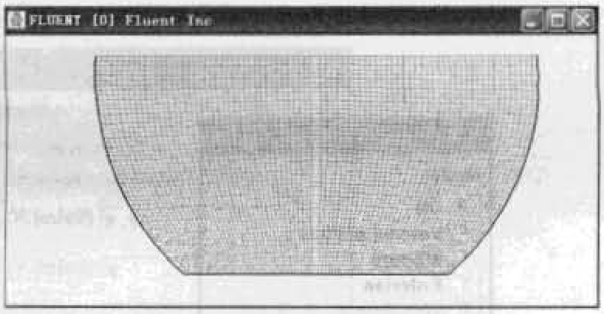


图7-19　旋转后的网格显示

7. 执行 Define→Models→Solver...命令，弹出 Solver 对话框，如图 7-20 所示。选择 Space 选项下面的 Axisymmetric Swirl，因本例为非定常模型，故选择 Time 下的 Unsteady，单击 OK 按钮。

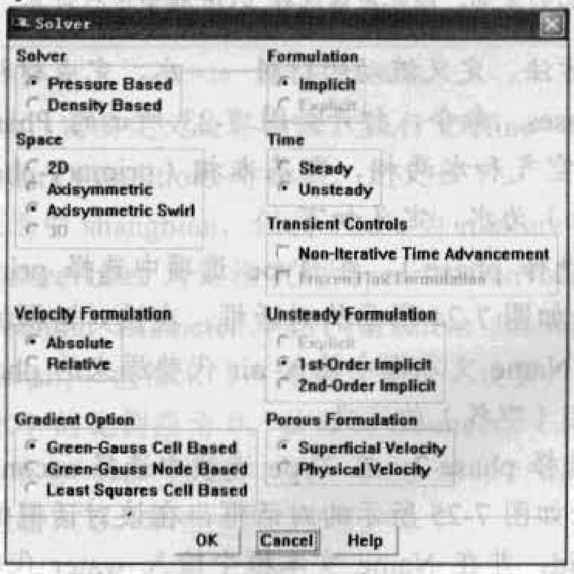


图7-20　基本求解器的设置

8. 由于水的密度和动力粘度分别为 998.2kg/m^3 和 0.001003kg/（m·s），在 2rad/s 的角速度下，旋转水的雷诺数约 10^6，故需要启动湍流模型。执行 Define→Models→Viscous…命令，弹出 Viscous Model 对话框，在 Model 选项中选择 k-epsilon[2 eqn]，在 k-epsilon Model 选项下选择 Standard，保留其他默认设置，单击 OK 按钮。
9. 下面需要启用多相流模型。执行 Define→Models→Multiphase…命令，弹出如图 7-21 所示的 Multiphase Model 对话框，FLUENT 默认的为单相流模型，即为 Off。列表中的 Volume of Fluid、Mixture、Eulerian 分别对应了 VOF 模型、混合模型和欧拉模型。本例需要采用 VOF 模型，故选中 Volume of Fluid，Multiphase Model 对话框自动展开，保持默认参数设置，如图 7-22 所示，单击 OK 按钮，关闭该对话框。



图7-21　Multiphase Model 对话框

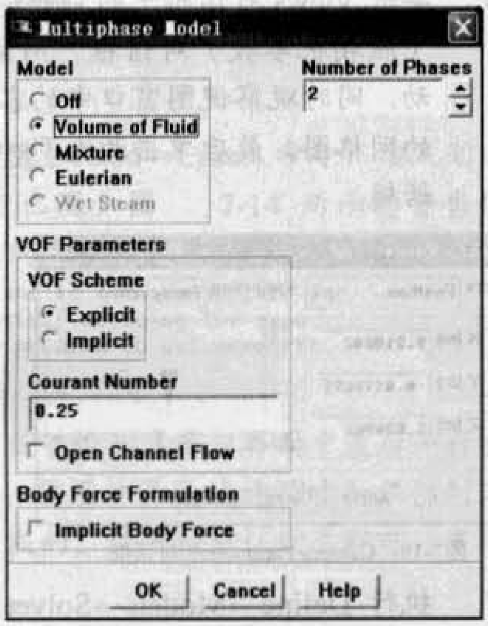


图7-22　VOF 模型设置

注意：由于本例为含有自由液面的流动，因此应该选择 VOF 模型进行计算。

10. 参照前面介绍的方法，定义流动的材料——水，完成材料物性的定义。
11. 执行 Define→Phases…命令，打开如图 7-23 所示的 Phases 对话框进行相的定义。本例涉及到空气和水两相，即基本相（primary-phase）为空气，第二相（secondary-phase）为水，定义如下。

- 在 Phase 列表中选择 phase-1，在 Type 选项中选择 primary-phase，然后单击 Set... 按钮，打开如图 7-24 所示的对话框，在该对话框的 Phase Material 列表中选择 air，并在 Name 文本框中输入 air 代替原来的 phase-1，最后单击 OK 按钮，完成基本相（空气）的定义。
- 在 Phase 列表中选择 phase-2，在 Type 选项中选择 secondary-phase，然后单击 Set... 按钮，打开如图 7-25 所示的对话框，在该对话框的 Phase Material 列表中选择 water-liquid，并在 Name 文本框中输入 water 代替原来的 phase-2，最后单击 OK 按钮，完成第二相（水）的定义。



图7-23　Phases 对话框

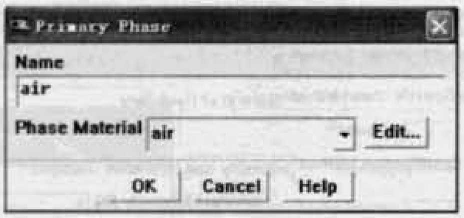


图7-24　基本相的定义

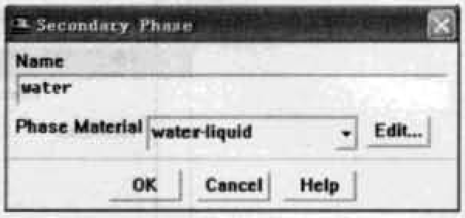


图7-25　第二相的定义

12. 下一步设置计算的环境。执行 Define→Operating Conditions 命令，打开 Operating Conditions 对话框。如图 7-26 所示，选中 Gravity，指定重力方向为 *x* 轴，在 X[m/s2]右侧输入 9.81，即重力方向指向容器底部。选择 Specified Operating Density 选项，保持 Operating Density[kg//m3]为 1.225，此为空气的密度。这里通常把密度较小的相的密度值设置为参考密度，这样可以减小计算两相动量平衡时的数值截断误差，而压力参考点的位置为坐标原点，该点正是容器敞口正中间，所处的压力值恰为一个大气压，故默认的 1.225 值是合理的。最后单击 OK 按钮，关闭该对话框。

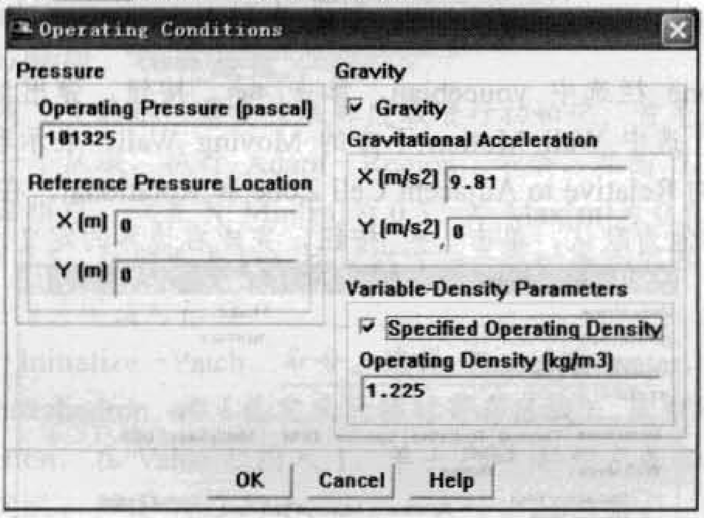


图7-26　操作环境的设置

13. 工作压强设置完后，需要定义边界数据。执行 Define→Boundary Conditions...命令，弹出 Boundary Conditions 对话框，定义如下。

- 在左边的 Zone 栏选中 shangbian，保持 Phase 为 mixture，单击 Set... 按钮，在图 7-27 所示 Pressure Inlet 对话框中的 Specification Method 下拉列表中选择 Intensity and Hydraulic Diameter，在 Turbulent Intensity[%]中输入 1，在 Hydraulic Diameter[m]中也输入 1，保持其他默认设置，单击 OK 按钮。压力入口的第二相（水）的比例应为 0，故回到 Boundary Conditions 对话框中选择 Phase 为 water，单击 Set... 按钮，在图 7-28 所示对话框的 Multiphase 中的 Volume Fraction 栏输入 0，单击 OK 按钮。

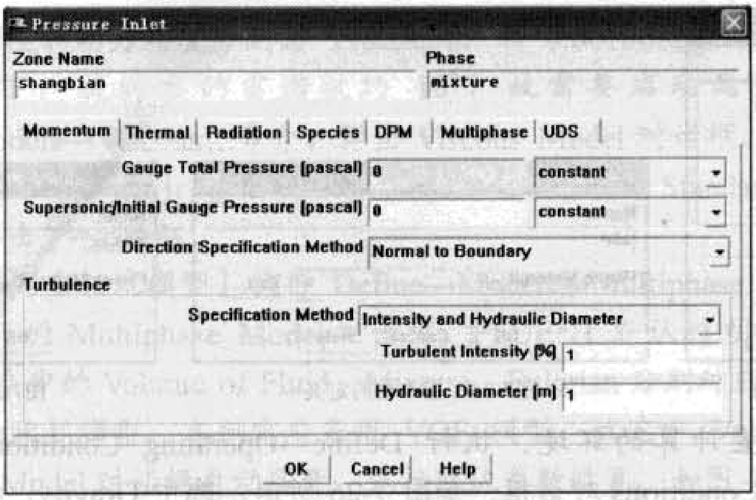


图7-27 Pressure Inlet 对话框

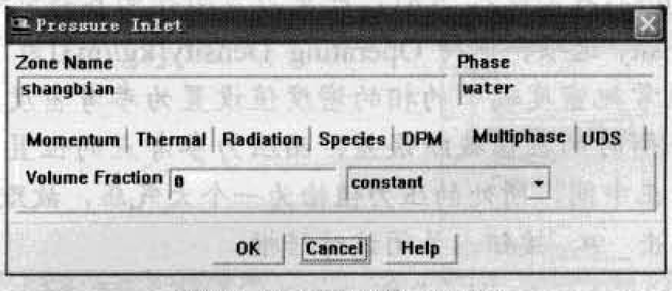


图7-28 压力入口的第二相设置

- 在左边的 Zone 栏选中 youcebian，单击 Set... 按钮，弹出如图 7-29 所示的 Wall 对话框。选中 Wall Motion 下方的 Moving Wall，表示容器在旋转，选择 Motion 下方的 Relative to Adjacent Cell Zone 和 Rotational，在 Speed[rad/s]栏输入 2，保持其他为默认，单击 OK 按钮，完成右边界的定义。

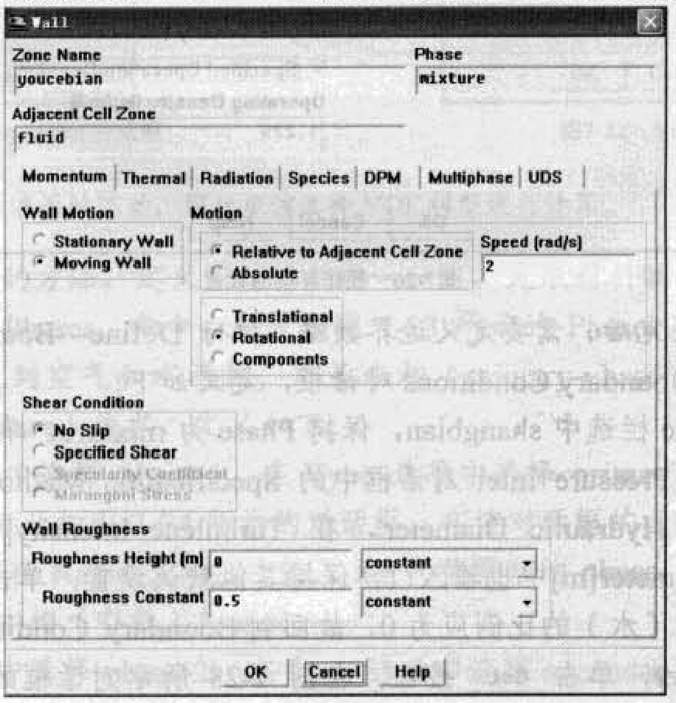


图7-29 壁面边界定义

- 同理，底边的定义和右侧边的定义一致，也以 2rad/s 旋转。
- 保持 zhou 为 axis 边界。

14. 下面对求解参数进行设置。执行 Solve→Control→Solution...命令，在 Solution Controls 对话框将 Discretization 项的 Pressure 设置为 PRESTO!，Volume Fraction 设置为 Geo-Reconstruct，将 Pressure-Velocity Coupling 压力速度耦合方式改为 PISO 格式，保持其他默认设置，如图 7-30 所示，单击 OK 按钮。

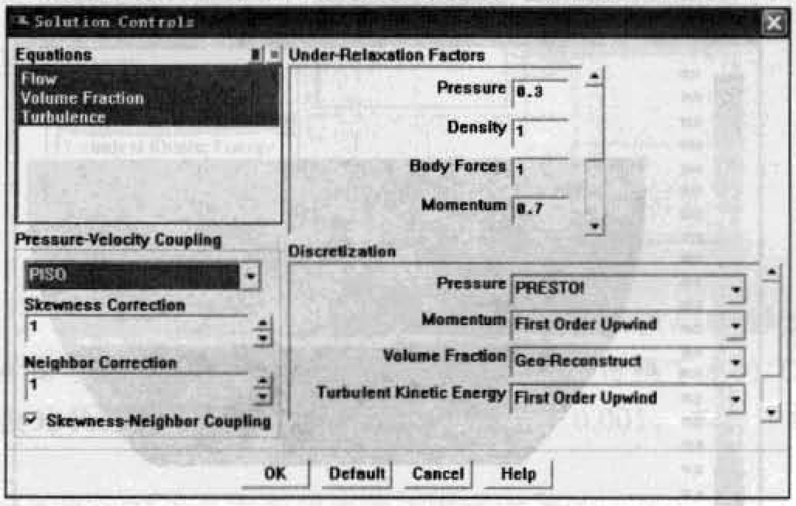


图7-30　求解控制参数的设置

15. 接下来对流场进行初始化，执行 Solve→Initialize→Initialize...命令，在 Solution Initialization 对话框中选择 shangbian，对进口初始化，顺序单击 Init 、Apply 按钮、Close 按钮。

16. 本例底部存有 2/5 的水，需要将底部区域进行初始化。首先用类似网格自适应的方法定义一个区域，执行 Adapt→Region...命令，在图 7-31 所示的 Region Adaption 对话框中，设置 X Min[m]为 0.3，X Max[m]为 0.5，Y Min[m]为 0，Y Max[m]为 0.5，然后单击 Mark 按钮创建一个临时寄存容器底部 2/5 的区域，单击 Close 按钮关闭该对话框。

17. 执行 Solve→Initialize→Patch...命令，选择 Phase 为 water，单击 Registers to Patch 中的 hexahedron -r0（已定义的临时寄存区域），选中 Variable 列表中的 Volume Fraction，在 Value 栏输入 1，单击 Patch 按钮完成容器底部 2/5 区域为水的初始化定义，如图 7-32 所示。

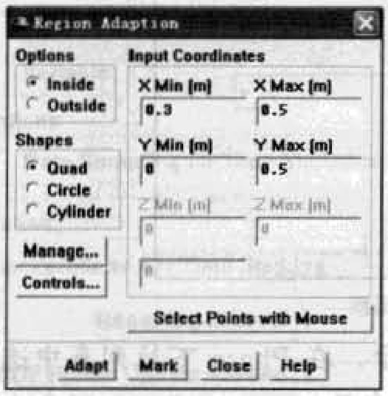


图7-31　Region Adaption 对话框

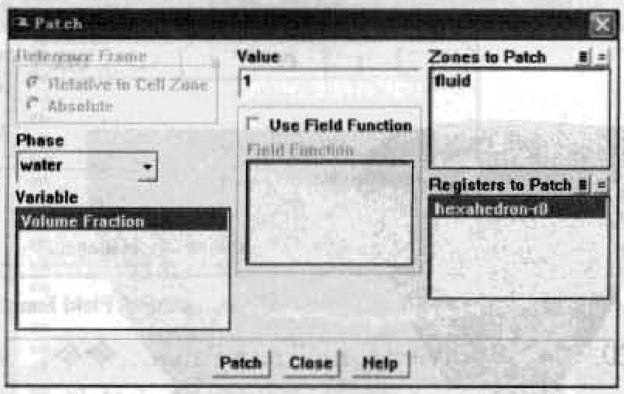


图7-32　初始化区域

18. 此时，我们可以检查一下容器底部是否有水的存在，执行 Display→Contours...命令，选择 Contours of 为 Phase...和 Volume fraction，选择 Phase 为 air，勾选 Options 栏中的 Filled 选项，单击 Display 按钮，弹出如图 7-33 所

示的视图窗口，图中显示了空气体积分数的云图，红色区域为空气，蓝色区域为水。

注意：由于使用的是临时区域，若再次读入 cas 文件时，必须重新初始化区域。

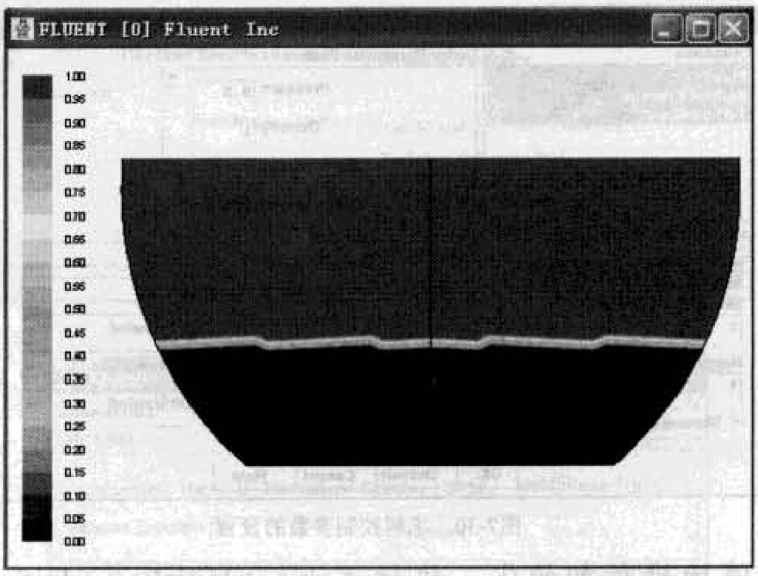


图7-33　初始化区域后的空气的体积分数显示

19. 接着定义一个用户函数。执行 Define→Custom Field Functions...命令，在图 7-34 所示的 Custom Field Functions Calculator 对话框的 Definition 中单击 2 和 ×，然后选择 Field Functions 中的 Grid...和 Radial Coordinate，单击 Select 按钮，使得 Definition 输入框中显示为 2*radial-coordinate，最后在 New Function Name 文本框中输入函数名字 swirl，单击 Define 按钮完成函数的定义，单击 Close 按钮关闭该对话框。

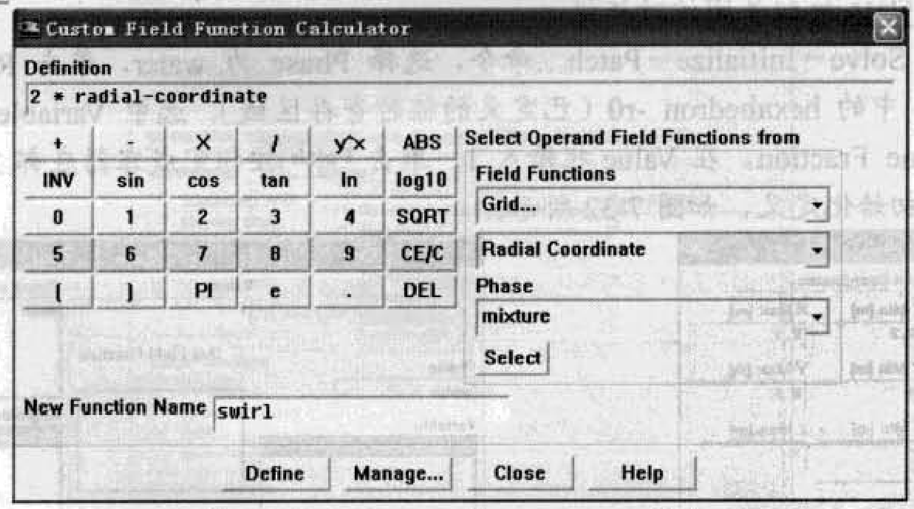


图7-34　Custom Field Functions Calculator 对话框

20. 执行 Solve→Initialize→Patch...命令，如图 7-35 所示，在 Phase 下拉列表中选择 mixture，在 Variable 列表中选择 Swirl Velocity，在 Registers to Patch 列表中仍选中 hexahedron-r0，勾选 Use Field Function 选项，在 Field Function 列表中选择定义好的函数 swirl，最后单击 Patch 按钮完成旋转角速度的初始化定义。

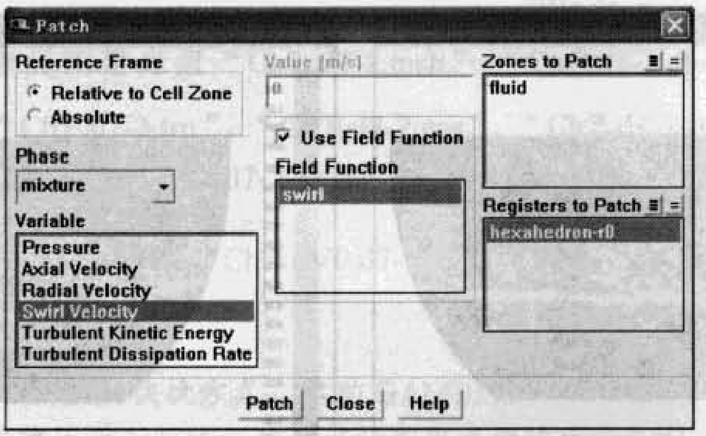


图7-35　初始化旋转速度

21. 初始化后，执行 Solve→Monitors→Residual...命令，在弹出的 Residual Monitors 对话框中选中 Plot，打开残差曲线图。对话框下方的 Criteria 中可以输入各参数的收敛精度要求，FLUENT 默认为 0.001，本例保持默认，单击 OK 按钮。
22. 执行 File→Write→Case...命令，将工程文件保存为 sl7-1.cas。
23. 执行 Solve→Iterate...命令，设置时间步长为 0.005s，时间步为 80，如图 7-36 所示，单击 Iterate 按钮开始解算。
24. 计算停止后，执行 File→Write→Data...命令，保存 sl7-1-0.4s.dat。接着继续以同样的时间步长迭代 40 步和 80 步，分别保存结果文件为 sl7-1-0.6s.dat 和 sl7-1-1s.dat。
25. 执行 Display→Contours...命令，查看 3 个时刻的空气体积分数分布，如图 7-37 至图 7-39 所示，体现了水面随时间的变化。

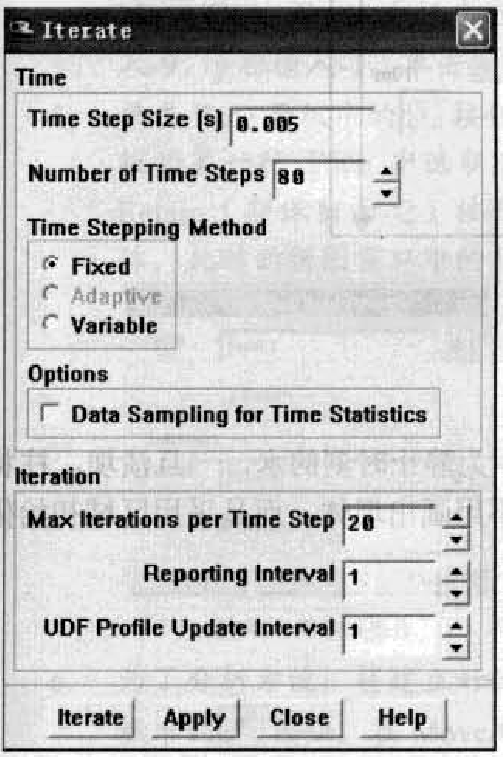


图7-36　迭代步长设置

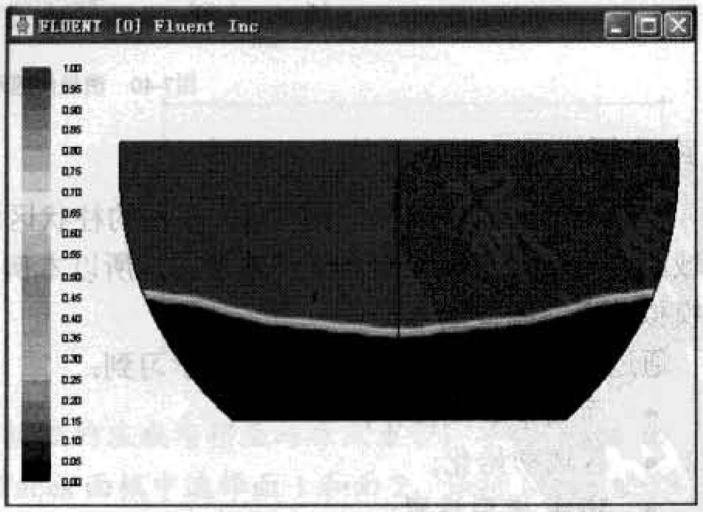


图7-37　0.4s 时的空气的体积分数云图

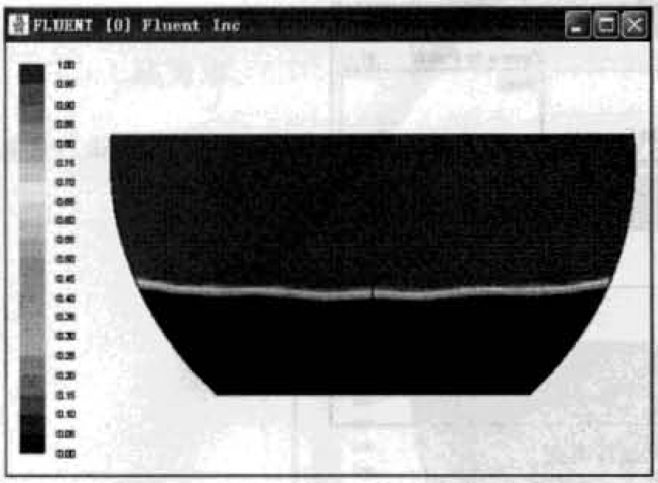


图7-38　0.6s 时的空气的体积分数云图

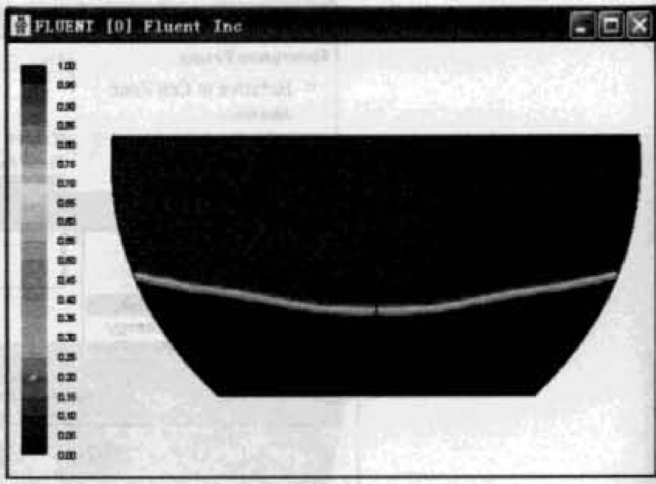


图7-39　1s 时的空气的体积分数云图

26. 最后，执行 File→Exit 命令，安全退出 FLUENT。

【实例 7-2】：二维溃坝过程流动模拟

坝是重要的水利水电工程，直接关系到下游人民的生命与财产的安全，一旦发生溃坝，其泄流速度及流量是人们关注的对象。下面针对这一问题利用 FLUENT 进行二维溃坝过程的流动模拟。

一、实例概述

如图 7-40 所示，左侧为蓄水 8m 高的水库，一旦右侧坝体垮塌，水将迅速冲向下游。

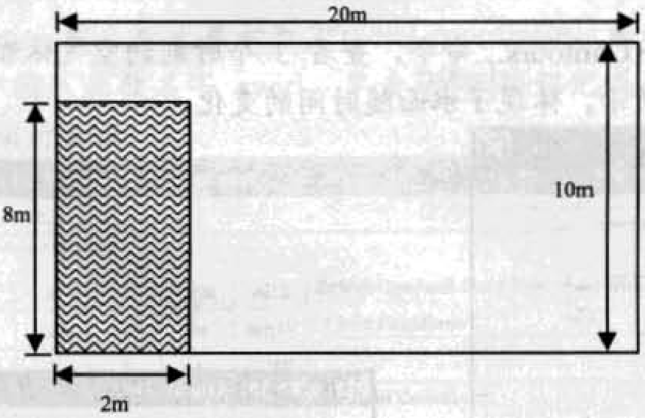


图7-40　溃坝问题示意图

思路分析

本例为二维溃坝问题，图 7-40 左侧的柱状区域表示为静止时刻的水，一旦溃坝，柱状区域的右侧壁（水坝）相当于突然拿去，所以本例可以不用画出坝体，而是采用区域初始化来模拟溃坝前静止的水。

通过本实例的演示过程，读者将学习到：

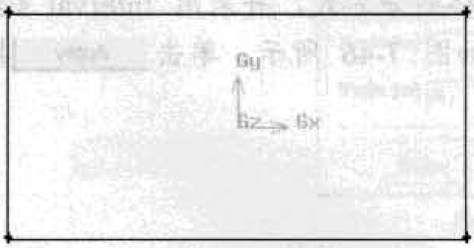
- 面域布尔减操作；
- 区域初始化；
- VOF 模型设置；
- 压强迭代终止准则设置。

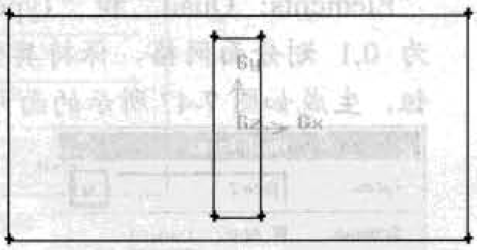
结果文件——参见附带光盘“Ch7\sl7-2.msh”、“Ch7\sl7-2.dbs”、“Ch7\sl7-2.jou”、“Ch7\sl7-2.trn”、“Ch7\sl7-2.cas”、“Ch7\sl7-2-0.2s.dat”、“Ch7\sl7-2-0.5s.dat”、“Ch7\sl7-2-1s.dat”。

动画演示——参见附带光盘“Ch7\AVI\sl7-2.avi”。

二、模型建立

1. 双击 GAMBIT 的桌面快捷方式，启动 GAMBIT。
2. 本例模型需要建立两个面域，然后进行布尔减操作生成如图 7-40 所示的几何模型。单击 → → ，在 Create Real Rectangular Face 面板的 Width 和 Height 栏分别输入 20 和 10，单击 Apply 按钮，如图 7-41 所示，矩形中点与原点重合。
3. 在 Create Real Rectangular Face 面板的 Width 和 Height 中分别输入 2 和 8，单击 Apply，生成如图 7-42 所示的两个面域。


图7-41　生成的第一面域


图7-42　生成的两个面域

4. 下面需要将第二个面移动至合适位置，单击 Face 面板中的 按钮，在 Move/Copy Faces 面板中选择面 2，保持 Move 被选中，在 Global 下的 x 栏输入-9，y 栏输入-1，单击 Apply 按钮完成该面的移动操作。
5. 单击 Face 面板中的 按钮，在弹出的如图 7-43 所示的 Subtract Real Faces 面板的第一行 Face 中选取面 1，在第二行 Faces 中选取面 2，并单击下方的 Retain（即保留面 2）按钮呈红色显示，单击 Apply 按钮，完成布尔减操作。此时的视图窗口中的几何模型如图 7-44 所示。

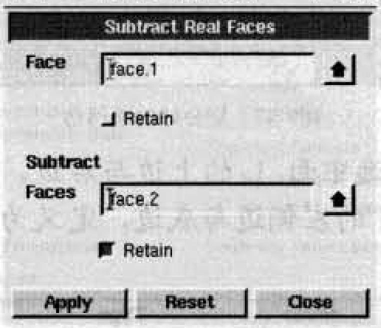


图7-43　布尔减操作


图7-44　布尔减后的面域

6. 为了分析方便，将建立好的几何模型的左底角移至与原点重合，单击 Face 面板中的 按钮，在 Move/Copy Faces 面板中选择面 1 和面 2，保持 Move 被选中，在 Global 下的 x 栏输入 10，y 栏输入 5，单击 Apply 按钮，如图 7-45 所示。

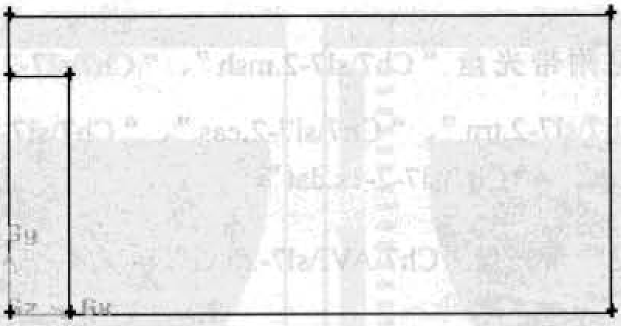


图7-45 移动后的几何模型

7. 最后需要读者注意的是在面 1 与面 2 内部接触的两条边存有重合的线段，需要将重合的线段合并为一条。单击 Edge 面板中的按钮，选中重合的边，单击 Apply 按钮。

三、网格划分

1. 下面对计算区域进行网格划分，由于本例的计算区域较简单，故单击 → → ，打开 Mesh Faces 面板，选中本例计算区域的面 1 和面 2，以 "Elements: Quad" 和 "Type: Map" 的网格划分方式，并采用 Interval size 为 0.1 划分面网格，保持其他默认设置，如图 7-46 所示，单击 Apply 按钮，生成如图 7-47 所示的面网格。

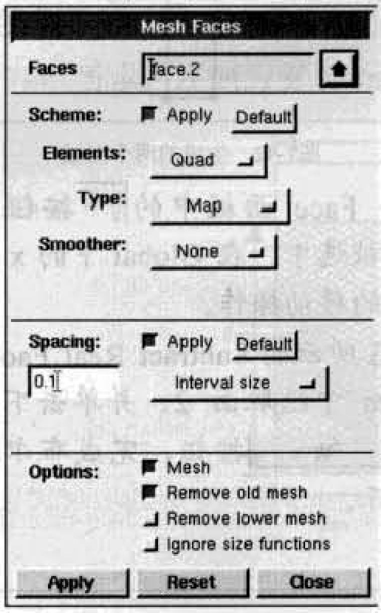


图7-46 面网格划分设置

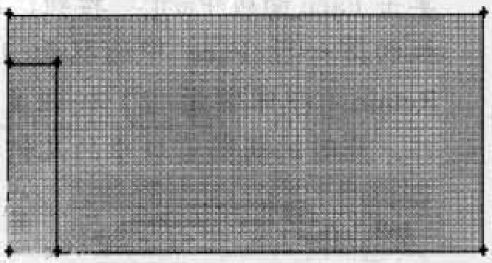
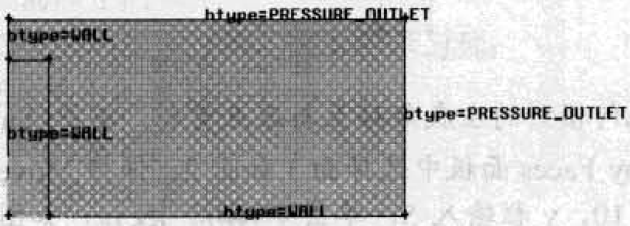


图7-47 划分好的面网格

2. 网格划分好后定义边界类型，单击 → ，选中面 1 的上边与右边，定义为压力出口边界（PRESSURE_OUT），选中面 1 的左侧边与底边，定义为壁面边界（WALL），如图 7-48 所示。



Name	Type
out	PRESSURE_OU
bianbi	WALL

图7-48 定义好的边界类型

3. 将原先静止的水所在区域定义为流体 1，单击 → ，在 Specify Continuum Types 面板中将面 2 定义为 FLUID，名称为 fluid1。

4. 执行 File→Export→Mesh 命令，将网格输出为 sl7-2.msh。

四、求解计算

1. 启动 FLUENT 二维单精度计算器，执行 File→Read→Case…命令，读入划分好的网格文件“sl7-2.msh”。网格读入之后，执行 Grid→Check 命令，检查网格的信息，待最后一行出现“Done”语句。

2. 执行 Grid→Scale…命令，弹出 Scale Grid 对话框，由于在 GAMBIT 中是按照 m 为单位 1:1 建立的几何模型，本例不需要重新定义网格的尺寸，从如图 7-49 所示的对话框中可以看出计算区域的尺寸范围。

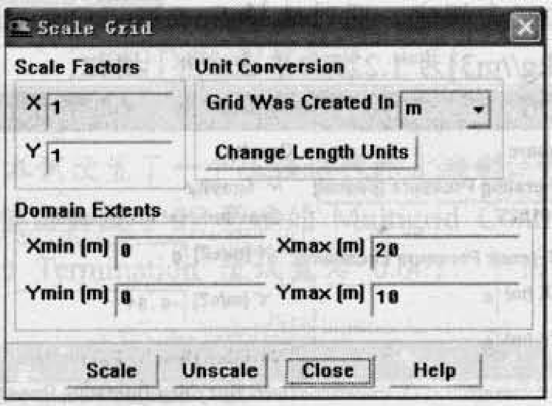


图7-49 Scale Grid 对话框

3. 执行 Define→Models→Solver…命令，弹出 Solver 对话框，如图 7-50 所示。选中 Time 下方的 Unsteady，启用非定常计算，其余保持默认，单击 OK 按钮。

4. 执行 Define→Models→Multiphase…命令，在弹出的 Multiphase Model 对话框中选择 Volume of Fluid，Multiphase Model 对话框自动展开，保持默认参数设置，如图 7-51 所示，单击 OK 按钮，关闭该对话框。

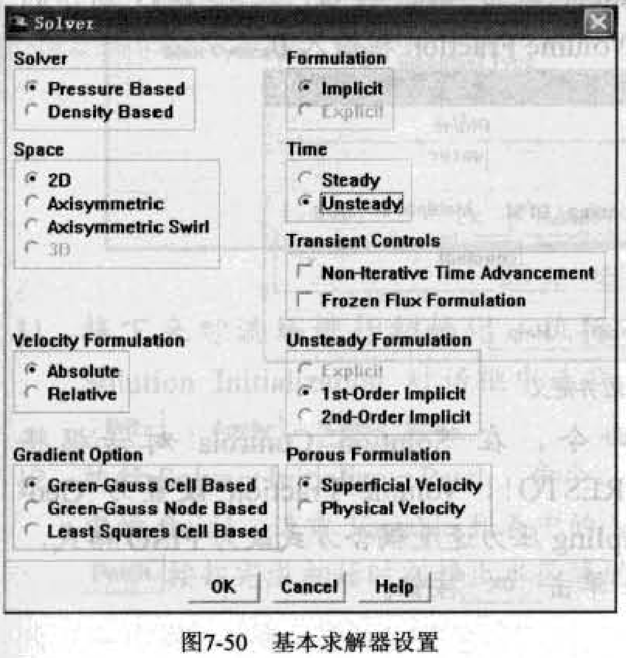


图7-50 基本求解器设置

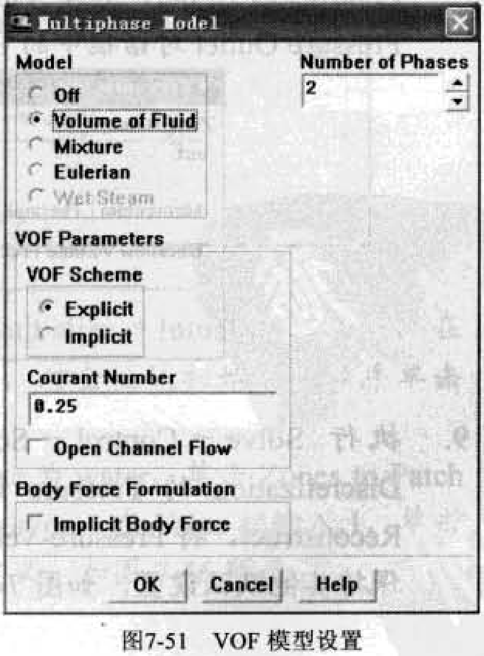


图7-51 VOF 模型设置

5. 定义流动的材料——水，完成材料物性的定义。
6. 定义基本相和第二相。执行 Define→Phases...命令，在 Phase 列表中选择 phase-1，在 Type 选项中选择 primary-phase，然后单击 Set... 按钮，在打开对话框的 Phase Material 列表中选择 air，并在 Name 文本框中输入 air 代替原来的 phase-1，单击 OK 按钮。在 Phase 列表中选择 phase-2，在 Type 选项中选择 secondary -phase，单击 Set... 按钮，在打开对话框的 Phase Material 列表中选择 water-liquid，并在 Name 文本框中输入 water 代替原来的 phase-2，单击 OK 按钮。
7. 执行 Define→Operating Conditions 命令，打开 Operating Conditions 对话框。如图 7-52 所示，选中 Gravity，指定重力方向为 y 轴，在 Y[m/s2]右侧输入 -9.81，即重力方向指向坝底。同时选择 Specified Operating Density 选项，保持 Operating Density[kg//m3]为 1.225，单击 OK 按钮。

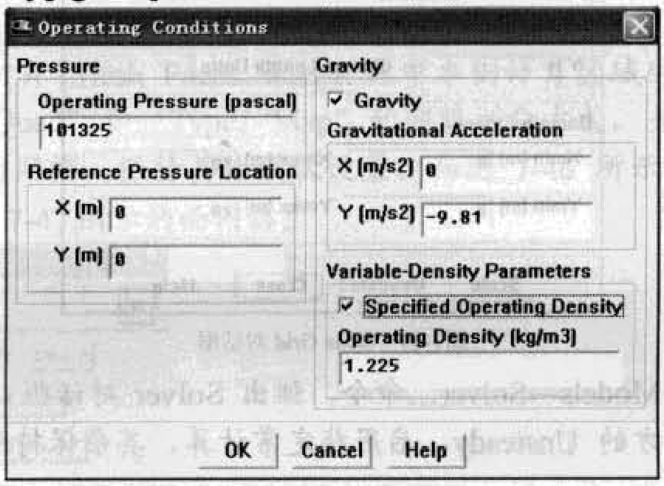


图7-52　操作环境设置

8. 接着定义边界条件，执行 Define→Boundary Conditions...命令，弹出 Boundary Conditions 对话框。本例只需将出口水的回流体积分数定义为 0，即在左边的 Zone 栏选中 out，选择 Phase 为 water，单击 Set... 按钮，在图 7-53 所示的 Pressure Outlet 对话框中的 Backflow Volume Fraction 栏输入 0。

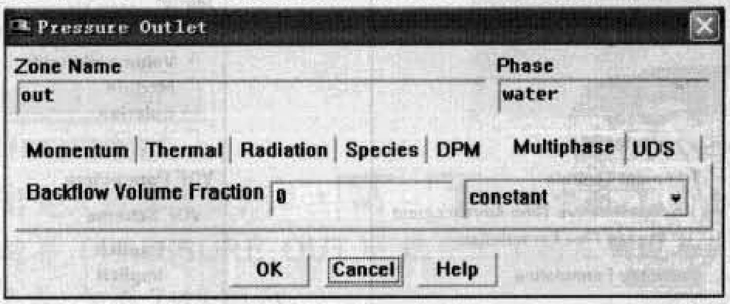


图7-53　边界定义

9. 执行 Solve→Control→Solution...命令，在 Solution Controls 对话框将 Discretization 的 Pressure 设置为 PRESTO!，Volume Fraction 设置为 Geo-Reconstruct，将 Pressure-Velocity Coupling 压力速度耦合方式改为 PISO 格式，保持其他默认设置，如图 7-54 所示，单击 OK 按钮。

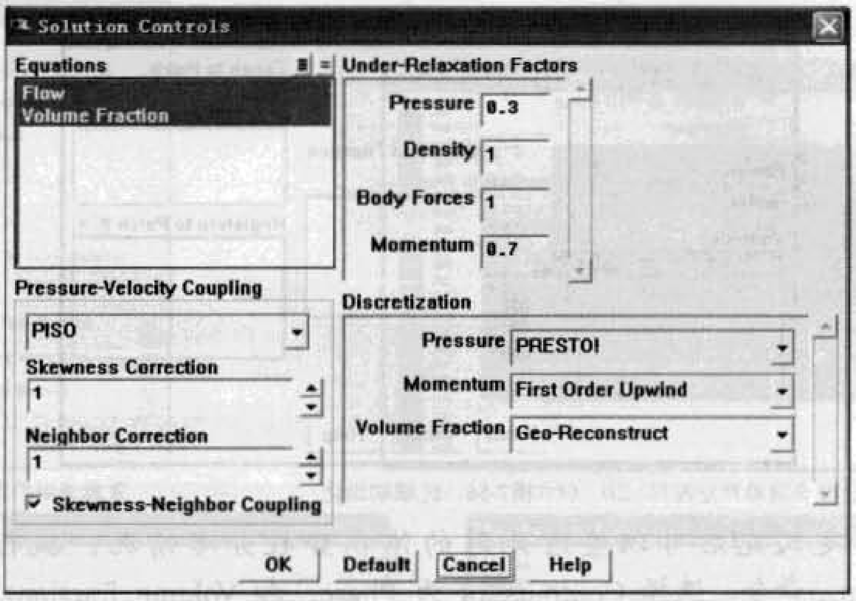


图7-54 求解参数设置

10. 与上例不同的是，本例设置了一个压强迭代终止准则，执行 Solve→Controls→Multigrid...命令，弹出如图 7-55 所示的 Multigrid Controls 对话框，将对话框的 Pressure 右侧的 Termination 值设置为 0.001，单击 OK 按钮关闭该对话框。

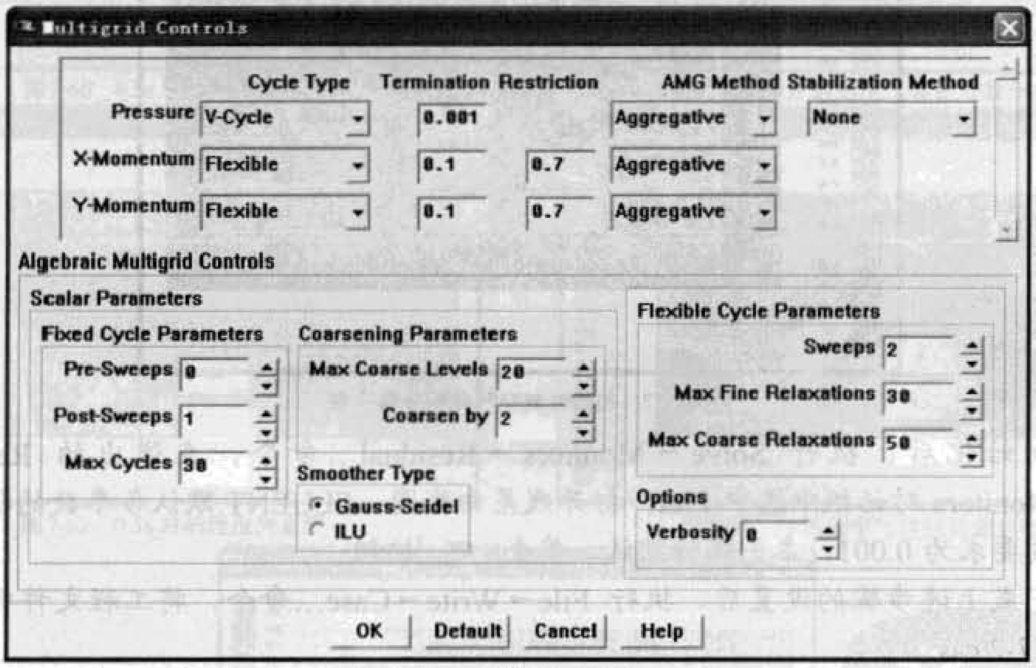


图7-55 迭代终止设置

11. 接下来对流场进行初始化，执行 Solve→Initialize→Initialize...命令，在 Solution Initialization 对话框中选择 all-zones，对全区域初始化，顺序单击 Init、Apply、Close 按钮。

12. 执行 Solve→Initialize→Patch...命令，选择 Phase 为 water，单击 Zones to Patch 中的 fluid1，选中 Variable 列表中的 Volume Fraction，在 Value 栏输入 1，单击 Patch 按钮完成初始时刻静止水区域的初始化定义，如图 7-56 所示。

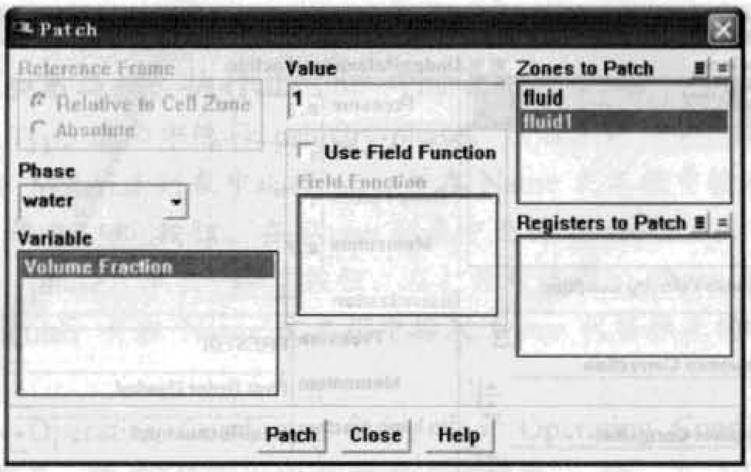


图7-56 区域初始化

13. 同样，定义完后可以查看此时的体积分数分布情况。执行 Display→Contours...命令，选择 Contours of 为 Phase...和 Volume fraction，选择 Phase 为 air，勾选 Options 栏中的 Filled 选项，单击 Display 按钮，弹出如图 7-57 所示的视图窗口，图中显示了初始时刻静止水的区域，呈蓝色显示。

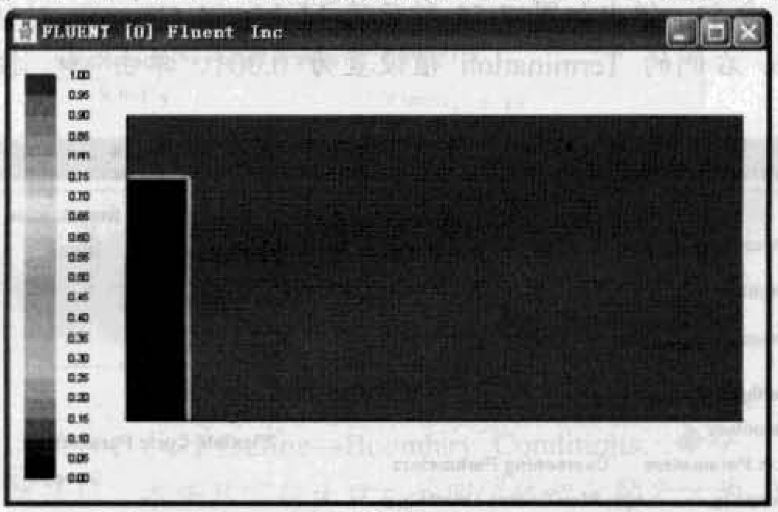


图7-57 初始时刻空气体积分数分布

14. 初始化后，执行 Solve→Monitors→Residual...命令，在弹出的 Residual Monitors 对话框中选中 Plot，打开残差曲线图。FLUENT 默认各参数的收敛精度要求为 0.001，本例保持默认，单击 OK 按钮。
15. 完成上述步骤的设置后，执行 File→Write→Case...命令，将工程文件保存为 sl7-2.cas。
16. 执行 Solve→Iterate...命令，设置时间步长为 0.01s，时间步为 20，如图 7-58 所示，单击 Iterate 按钮开始解算。
17. 计算停止后，执行 File→Write→Data...命令，保存 sl7-1-0.2s.dat。接着继续以同样的时间步长迭代 30 步和 50 步，分别保存结果文件为 sl7-1-0.5s.dat 和 sl7-1-1s.dat。
18. 执行 Display→Contours...和 Display→Vectors...命令，查看 3 个时刻的空气体积分数分布和速度矢量图，如图 7-59 至图 7-64 所示，体现了随时间推进溃坝后的水流流动过程。

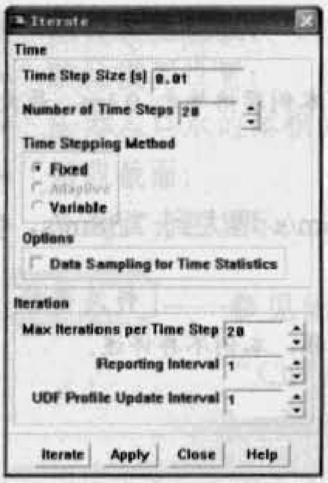


图7-58 迭代步长设置

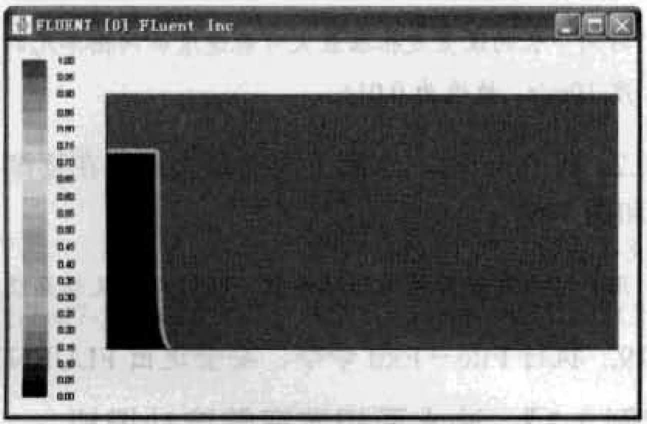


图7-59 0.2s 时的空气体积分数分布

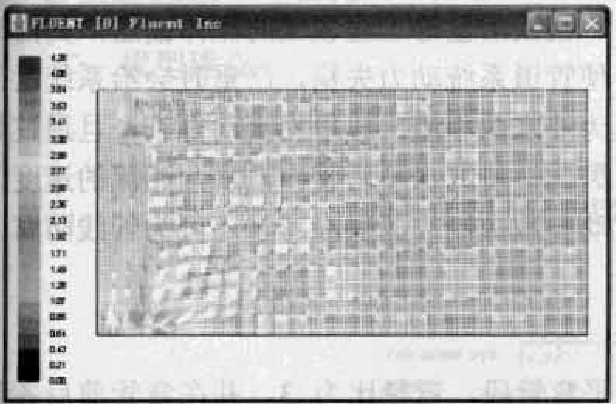


图7-60 0.2s 时的速度矢量图

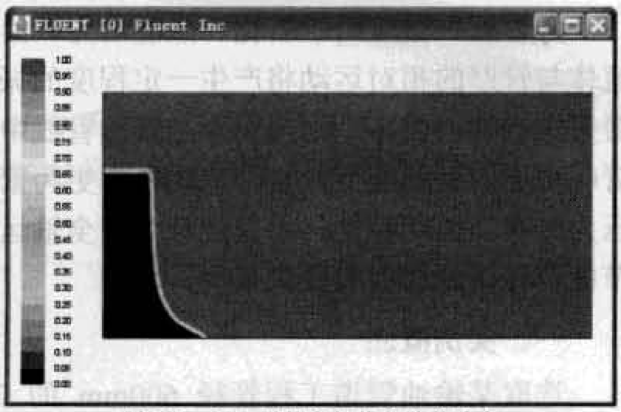


图7-61 0.5s 时的空气体积分数分布

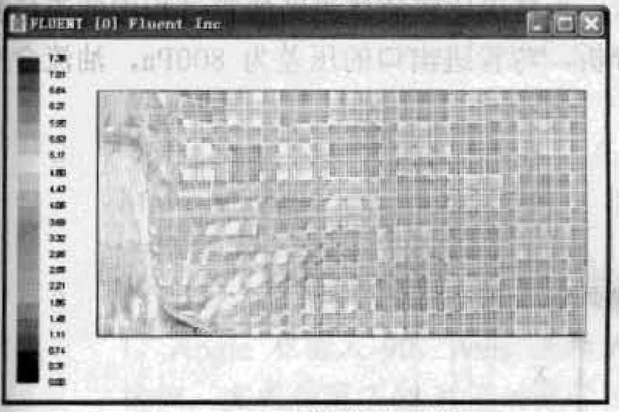


图7-62 0.5s 时的速度矢量图

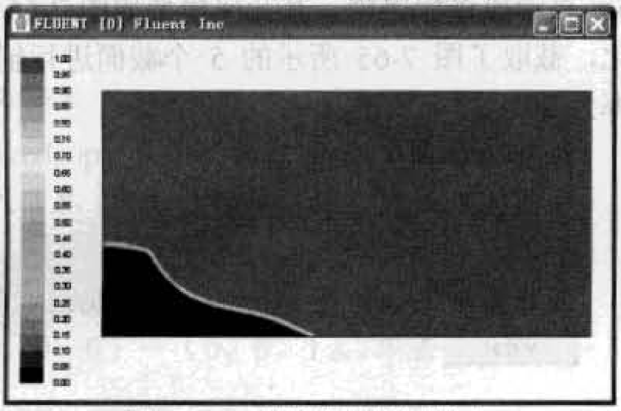


图7-63 1s 时的空气体积分数分布

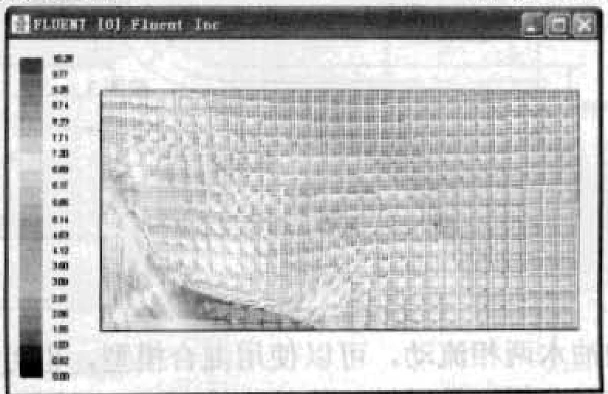


图7-64 1s 时的速度矢量图

由图中可见，溃坝并不是瞬时的，而是存在一个短暂的过程，水先由下部开始垮塌，水体区域的高度随之下降。由速度矢量图可见，在水流下泻的过程中，水与空气间存在剧烈的

相互作用，水卷吸部分空气形成气泡。

注意：时间步长的设置是根据最大可能速度和网格单元的尺度来决定的，本例网格单元 0.1m，最大可能速度 10m/s，故选为 0.01s。

0.2s 和 0.5s 时，水流下泻的最大速度在逐渐增加，由 4.26m/s 增大到 7.38m/s，参见图 7-60 和图 7-62。

注意：用户可以增长时间步继续迭代，也可以定义动画观察溃坝的整个过程，本例不再详述。

19. 执行 File→Exit 命令，安全退出 FLUENT。

【实例 7-3】：油水两相流弯管流动模拟

弯管被广泛应用于石化、热能动力、给排水、钢铁冶金等工程领域的流体输送，其内部流体与管壁的相对运动将产生一定程度的振动而使管道系统动力失稳，严重时会给系统运行带来灾难性的毁坏。而现今原油集输管线中普遍为油水两相流，较单相流动复杂，且通过弯管时由于固壁的突变，使得流动特性更为繁杂。因此，研究水平弯管内油水两相流的速度、压力分布等流动特性，不仅能够为安全输运、流动参数控制等提供参考，还可为管线防腐、节能降耗措施选取等提供依据。

一、实例概述

选取某输油管道工程管径 600mm 的 90°水平弯管段，弯径比为 3，并在弯管前后各取 5m 直管段进行建模，其几何模型如图 7-65 所示。为精确比较流体流经弯管过程中的流场变化，截取了图 7-65 所示的 5 个截面进行辅助分析。弯管进出口的压差为 800Pa，油流含水率为 20%。

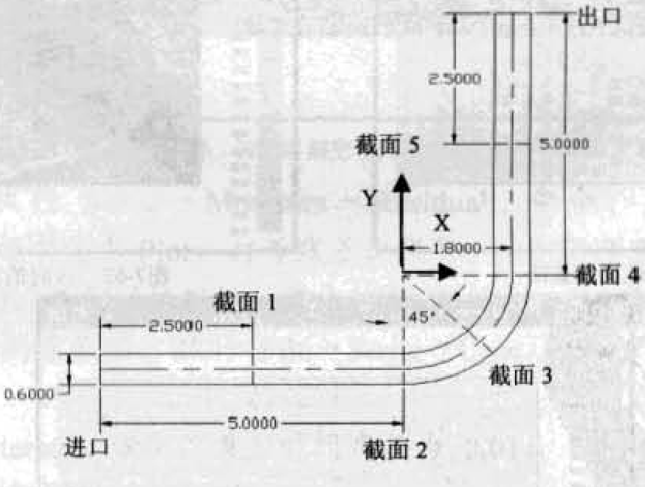


图7-65 弯管几何模型示意图

思路分析

本例为三维弯管内的油水两相流动，可以使用混合模型，也可以使用欧拉模型。那么，本例同时采用两种模型进行分析，最后做一简单比较。

通过本实例的演示过程，读者将学习到：

- 三维弯管的建模；

- 混合模型设置；
- 欧拉模型设置；
- 压力入口水的体积分数设置；
- 切取截面；
- 多截面云图显示。

结果文件——参见附带光盘“Ch7\sl7-3.msh”、“Ch7\sl7-3.dbs”、“Ch7\sl7-3.jou”、“Ch7\sl7-3.trn”、“Ch7\sl7-3.cas”、“Ch7\sl7-3-mixture.dat”、“Ch7\sl7-3-euler.dat”。

动画演示——参见附带光盘“Ch7\AVI\sl7-3.avi”。

二、模型建立

1. 启动 GAMBIT，单击 → → ，选择圆面生成面板的 Plane 为 ZX，输入半径 Radius 为 0.3，单击 Apply 按钮生成圆面，如图 7-66 所示。

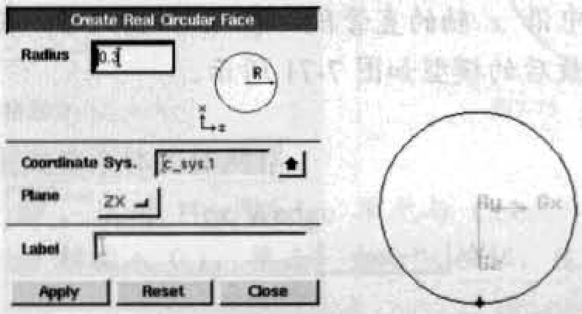


图7-66　生成的圆面

2. 单击 Face 面板中的 按钮，在 Move/Copy Faces 面板中选择圆面，保持 Move 被选中，在 Global 下的 x 栏输入 1.8，单击 Apply 按钮完成该面的移动操作。
3. 单击 → → ，在图 7-67 所示的 Revolve Faces 面板的 Faces 中选取面 1，Angle 栏输入-90，Axis 选择为（0，0，0）→（0，0，1），单击 Apply 按钮，生成如图 7-68 所示的弯管主体。

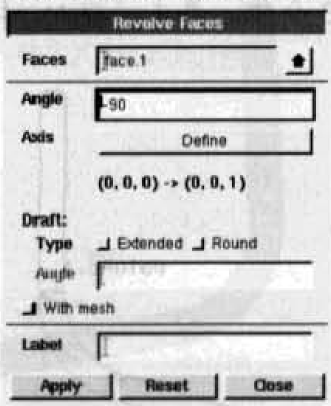


图7-67　旋转面生成体面板

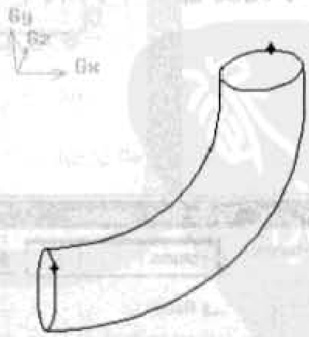


图7-68　弯管主体

4. 下面创建弯管前后的 5m 直管段，单击 → → ，在 Create Real Cylinder 面板的 Height 栏输入 5，在 Radius1 栏输入 0.3，不用输入 Radius2，

即表示 Radius2 与 Radius1 同数值。选择 Axis Location 为 Positive X，单击 Apply 按钮生成沿 x 方向的 5m 直管段，如图 7-69 所示。

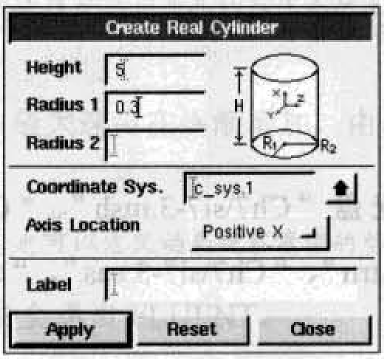


图7-69 圆柱体生成面板

5. 同方法，改变 Axis Location 为 Positive Y 生成沿 y 方向的 5m 直管段。此时的视图窗口如图 7-70 所示。
6. 下面需要将直管段移动至正确位置，执行 Volume 面板中的 Move/Copy 命令，选中沿 y 轴的直管段，在 x 栏输入 1.8，即向 x 轴正向平移 1.8，单击 Apply 按钮。然后，选中沿 x 轴的直管段，在 x 栏输入-5，在 y 栏输入-1.8，单击 Apply 按钮，最后的模型如图 7-71 所示。

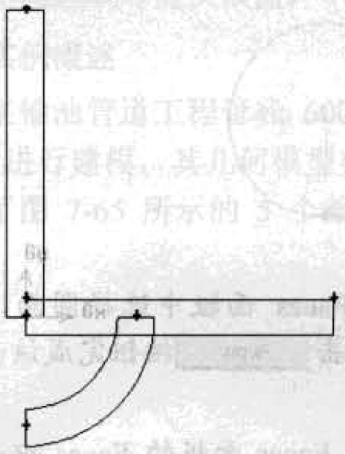


图7-70 绘制的直管段

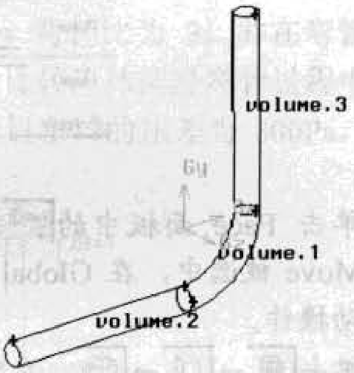


图7-71 生成的 3 个几何体

7. 下面需要将 3 个体合并成一个，单击 Volume 面板中的按钮，弹出如图 7-72 所示的 Unite Real Volumes 面板，选中生成的 3 个体，单击 Apply 按钮，此时视图窗口中只剩下一个体，如图 7-73 所示。

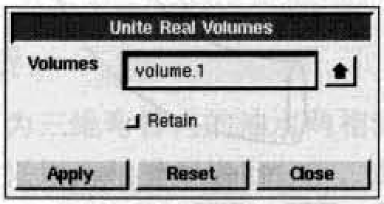


图7-72 体合并面板

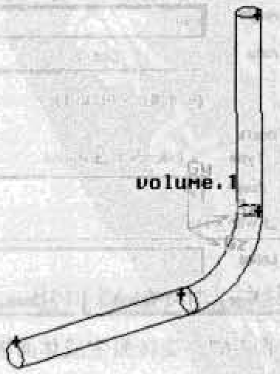


图7-73 弯管几何模型

三、网格划分

1. 单击[icon]→[icon]→[icon]，弹出 Create Boundary Layer 面板，在 Edges 黄色输入栏中选取线 3，视图中该线会出现一个红色的箭头，代表着边界层生成的方向。选中 1:1 的边界层生成方式，并设置第一个点距壁面距离为 0.001m，递增比例因子为 1.2，边界层为 4 层。单击 Apply 按钮即绘制完边界层网格，如图 7-74 所示。此时显示的为三角形网格，要等该面的面网格生成后才能看到真正的边界层网格。
2. 单击[icon]→[icon]→[icon]，打开 Mesh Faces 面板，运用 Quad 单元与 Pave 方法对该圆面进行划分，在 Interval size 栏输入 0.05，单击 Apply 按钮，生成的面网格如图 7-75 所示。

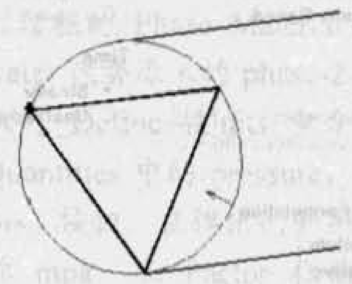


图7-74 边界层网格划分

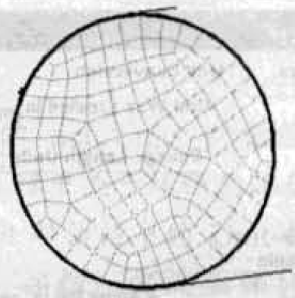


图7-75 划分好的圆面网格

下面以该面为源面，生成整个体的体网格。

3. 单击[icon]→[icon]→[icon]，运用 Hex/Wedge 单元与 Cooper 方法对该圆面进行划分，在 Interval size 栏输入 0.1，单击 Apply 按钮，生成的体网格如图 7-76 所示。
4. 网格划分好后定义边界类型，本例只需要定义进出口边界，选择面 4（face.4）作为进口，定义其为 PRESSURE_INLET，命名为 in；选择面 9（face.9）作为出口，定义其为 PRESSURE_OUTLET，命名为 out，定义好的边界类型如图 7-77 所示。
5. 执行 File→Export→Mesh 命令，输出三维模型网格文件 sl7-3.msh。

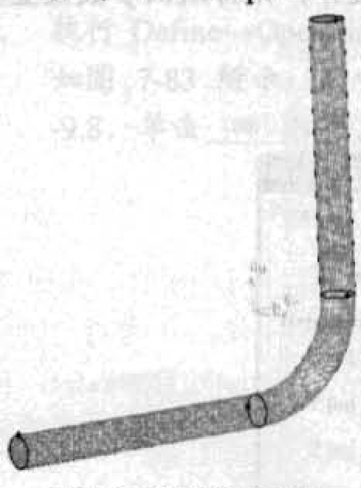


图7-76 划分好的体网格

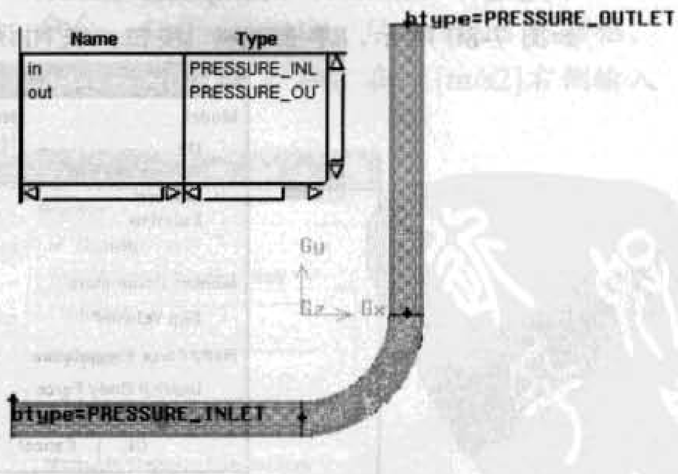


图7-77 边界类型定义

四、求解计算

1. 启动 FLUENT 三维单精度计算器，执行 File→Read→Case...命令，读入划分

好的网格文件“sl7-3.msh”。网格读入之后，执行 Grid→Check 命令，检查网格的信息，待最后一行出现“Done”语句。

2. 执行 Grid→Scale...命令，弹出 Scale Grid 对话框，本例不需要重新定义网格的尺寸，从如图 7-78 所示的对话框中可以看出计算区域的尺寸范围。

3. 执行 Define→Models→Solver...命令，弹出 Solver 对话框，如图 7-79 所示，本例保持默认设置，直接单击 OK 按钮。执行 Define→Models→Viscous...命令，弹出 Viscous Model 对话框，在 Model 选项中选择 k-epsilon[2 eqn]，在 k-epsilon Model 选项下选择 Realizable，保留其他默认设置，单击 OK 按钮。

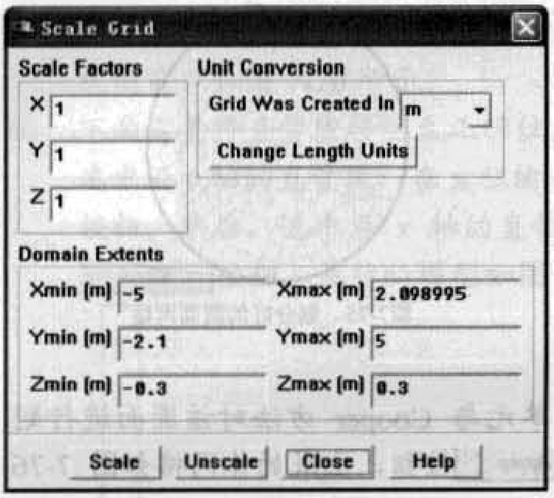


图7-78 Scale Grid 对话框

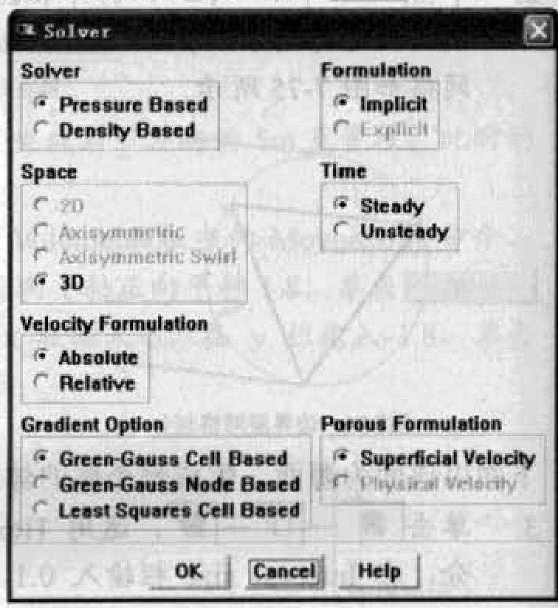


图7-79 Solver 对话框

4. 执行 Define→Models→Viscous...命令，弹出 Viscous Model 对话框，在 Model 选项中选择 k-epsilon[2 eqn]，在 k-epsilon Model 选项下选择 Realizable，保留其他默认设置，单击 OK 按钮。

5. 执行 Define→Models→Multiphase...命令，在弹出的 Multiphase Model 对话框中先选择 Mixture，Multiphase Model 对话框自动展开，保持默认参数设置，如图 7-80 所示，单击 OK 按钮，关闭该对话框。



图7-80 多相流模型设置

6. 执行 Define→Materials 命令，单击 Materials 对话框右侧的 Fluent Database... 按钮，在弹出的 Fluent Database Materials 对话框中，利用

滚动条选择 Fluent Fluid Materials 列表中的 water-liquid，单击 Copy 按钮，再找出列表中的 fuel-oil-liquid，单击 Copy 按钮，即将数据库中的材料——水和油都拷贝到当前工程中。单击 Close 按钮关闭该对话框。回到 Materials 对话框，即会发现在 Fluent Fluid Materials 下拉列表中存在了空气、水和油 3 种材料。最后单击 Materials 对话框中的 Close 按钮，完成材料物性的定义。

7. 下步定义基本相和第二相。与前面例子一样，执行 Define→Phases...命令，在 Phase 列表中选择 phase-1，在 Type 选项中选择 primary-phase，然后单击 Set... 按钮，在打开对话框的 Phase Material 列表中选择 fuel-oil-liquid，并在 Name 文本框中输入 oil 代替原来的 phase-1，单击 OK 按钮。在 Phase 列表中选择 phase-2，在 Type 选项中选择 secondary-phase，单击 Set... 按钮，在打开对话框的 Phase Material 列表中选择 water-liquid，并在 Name 文本框中输入 water 代替原来的 phase-2，单击 OK 按钮。
8. 执行 Define→Units 命令，弹出如图 7-81 所示的 Set Units 对话框，选择 Quantities 中的 pressure，在 Units 可以看到目前工程中关于压强的单位。单击 New... 按钮，在弹出的如图 7-82 所示的 Define Unit 对话框中的 Unit 栏输入名称 mpa，在 Factor 栏输入 1000000，单击 OK 按钮，定义压强的新单位 MPa。

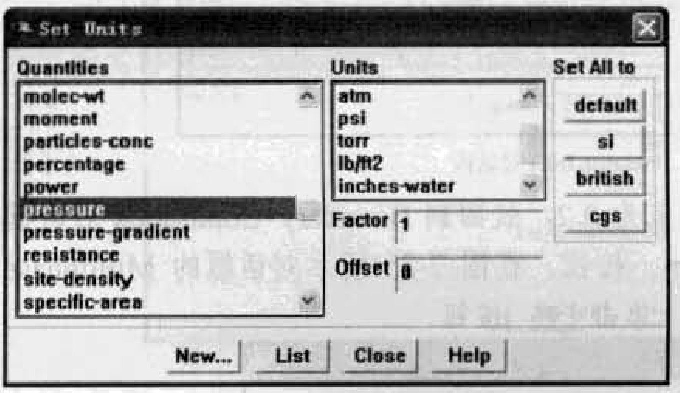


图7-81 单位设置对话框

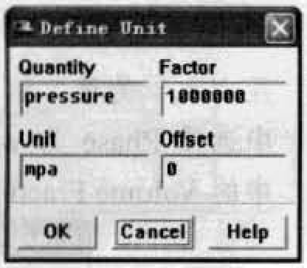


图7-82 新单位设置

9. 执行 Define→Operating Conditions 命令，打开 Operating Conditions 对话框。如图 7-83 所示，选中 Gravity，指定重力方向为 z 轴，在 Z[m/s2]右侧输入 -9.8，单击 OK 按钮。

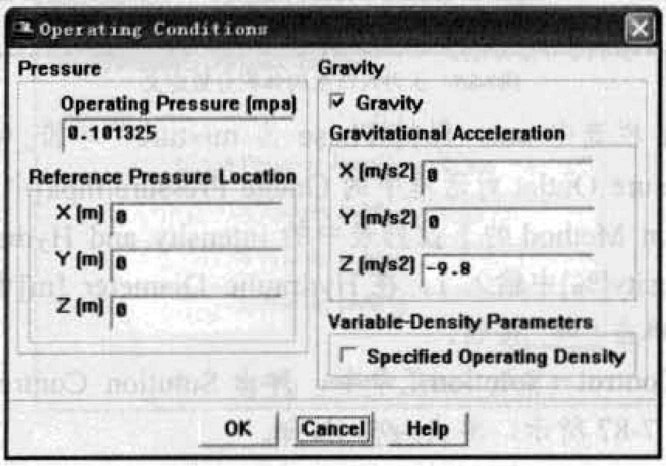


图7-83 操作环境设置

10. 接着定义边界条件，执行 Define→Boundary Conditions…命令，弹出 Boundary Conditions 对话框，定义如下。

- 在左边的 Zone 栏选中 in，保持 Phase 为 mixture，单击 Set... 按钮，在图 7-84 所示的 Pressure Inlet 对话框中的 Gauge Total Pressure[mpa]中输入 1，在 Supersonic/Intital Gauge Pressure[mpa]中输入 0.9995，选择 Specification Method 的下拉列表中的 Intensity and Hydraulic Diameter，在 Turbulent Intensity[%]中输入 1，在 Hydraulic Diameter[m]中输入 0.6，保持其他默认设置，单击 OK 按钮。

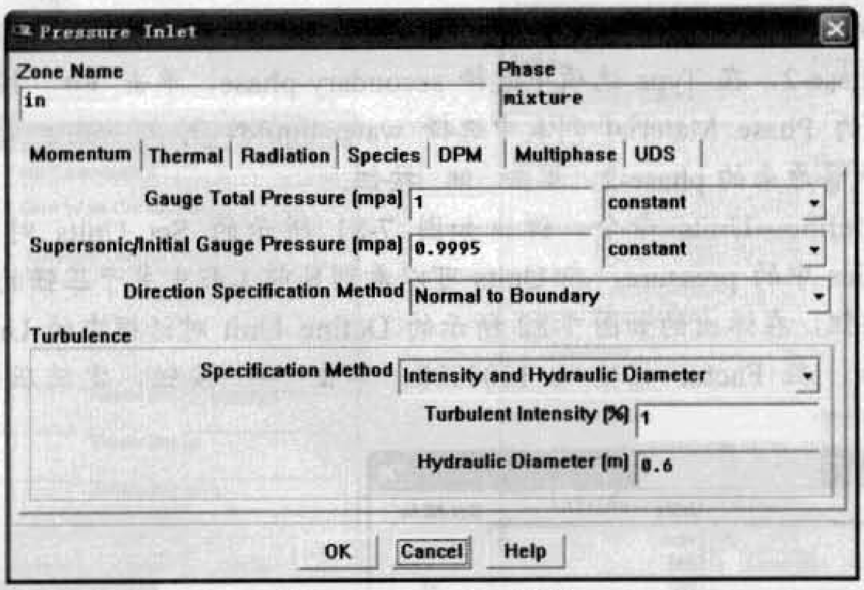


图7-84 Pressure Inlet 对话框

- 压力入口的第二相（水）的比例应为 0.2，故回到 Boundary Conditions 对话框中选择 Phase 为 water，单击 Set... 按钮，在图 7-85 所示对话框的 Multiphase 中的 Volume Fraction 栏输入 0.2，单击 OK 按钮。

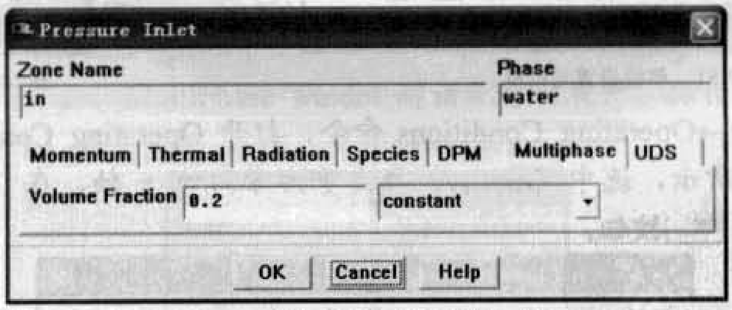


图7-85 压力入口水的体积分数定义

- 在左边的 Zone 栏选中 out，保持 Phase 为 mixture，单击 Set... 按钮，在图 7-86 所示的 Pressure Outlet 对话框中的 Gauge Pressure[mpa]中输入 0.9992，同样选择 pecification Method 的下拉列表中的 Intensity and Hydraulic Diameter，在 Turbulent Intensity[%]中输入 1，在 Hydraulic Diameter [m]中输入 0.6，保持其他默认设置，单击 OK 按钮。

11. 执行 Solve→Control→Solution…命令，弹出 Solution Controls 对话框，保持默认设置，如图 7-87 所示，单击 OK 按钮。

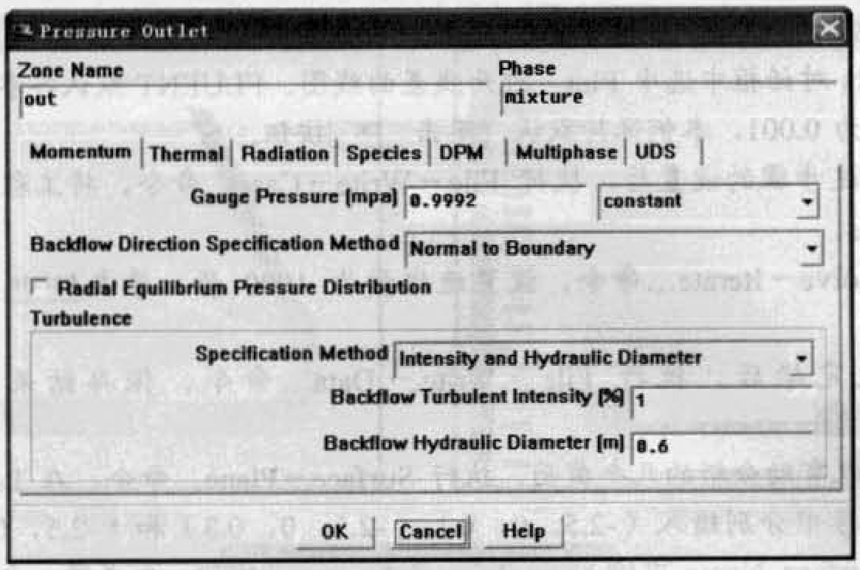


图7-86　压力出口定义

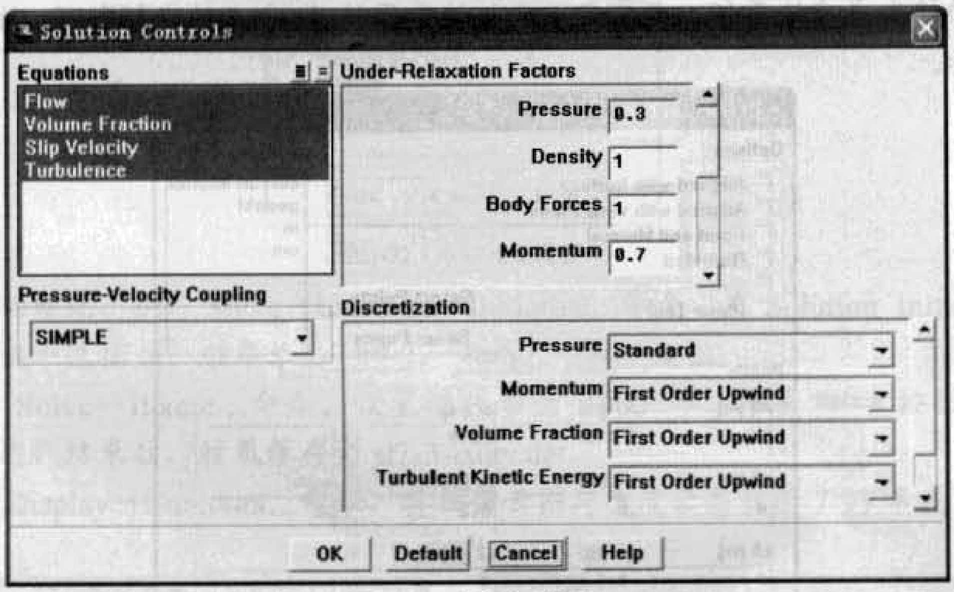


图7-87　求解参数控制

12. 接下来，对流场进行初始化，执行 Solve→Initialize→Initialize...命令，在 Solution Initialization 对话框中选择 in，对进口初始化，顺序单击 Init 、Apply 、Close 按钮，如图 7-88 所示。

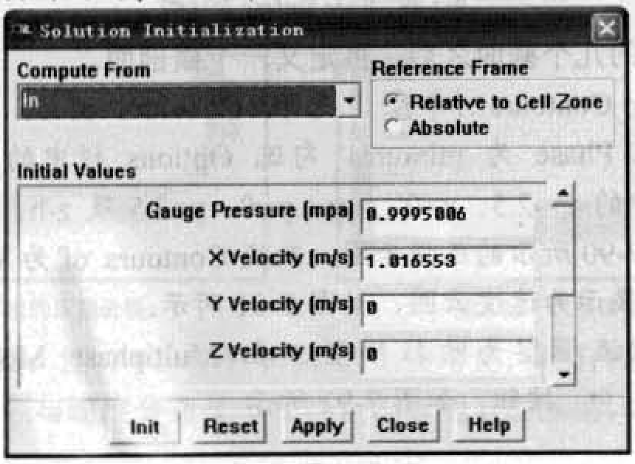


图7-88　初始化

13. 初始化后，执行 Solve→Monitors→Residual...命令，在弹出的 Residual Monitors 对话框中选中 Plot，打开残差曲线图。FLUENT 默认各参数的收敛精度要求为 0.001，本例保持默认，单击 OK 按钮。
14. 完成上述步骤的设置后，执行 File→Write→Case...命令，将工程文件保存为 sl7-3.cas。
15. 执行 Solve→Iterate...命令，设置迭代步为 1000 步，单击 Iterate 按钮开始解算。
16. 待迭代完毕后，执行 File→Write→Data...命令，保存结果文件 sl7-3-mixture.dat。
17. 下面截取有助分析的几个截面，执行 Surface→Plane...命令，在 Points 下方的三点坐标中分别输入（-2.5，0，0）、（-2.5，0，0.3）和（-2.5，0.3，0），在 New Surface Name 中输入 x=-2.5，单击 Create 按钮，生成第一个截面。其他截面的生成方法类似，只需定义表征该截面的 3 个点的坐标即可，如图 7-89 所示。



图7-89 Plane Surface 对话框

依次生成图 7-65 中的几个截面之后，再定义一个横剖面。

18. 执行 Display→Contours...命令，选取 Contours of 为 Pressure...和 Static Pressure，保持 Phase 为 mixture，勾选 Options 栏中的 Filled 选项，选择 Surfaces 列表中的 x=-2.5、x=0、x-p、y=0、y=2.5 及 z-h，单击 Display 按钮按钮则弹出如图 7-90 所示的压强云图。改变 Contours of 为 Velocity...和 Velocity Magnitude，则显示为速度云图，如图 7-91 所示。
19. 下面改变多相流模型为欧拉模型，在 Multiphase Model 对话框中选择 Eulerian，单击 OK 按钮，如图 7-92 所示。



图7-90 压强云图

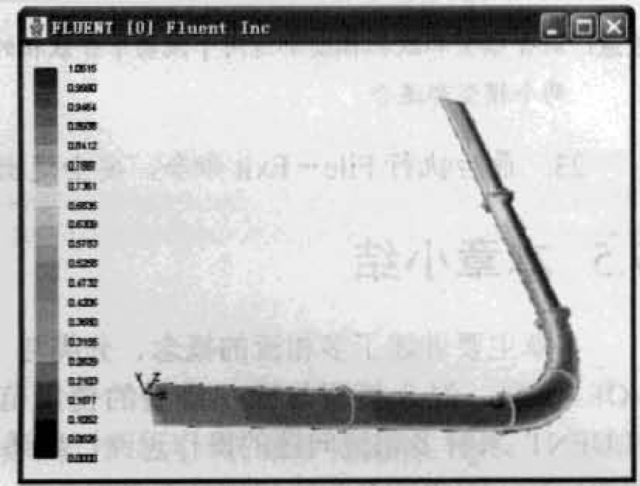


图7-91 速度云图

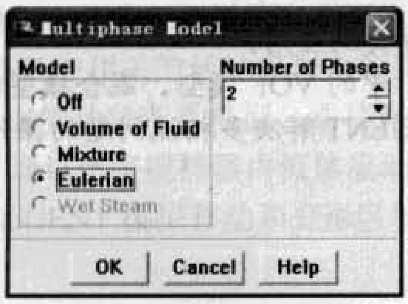


图7-92 欧拉模型设置

20. 再次初始化，执行 Solve→Initialize→Initialize...命令，在 Solution Initialization 对话框中选择 in，顺序单击 Init 、Apply 、Close 按钮。
21. 执行 Solve→Iterate...命令，设置迭代步为 1000 步，单击 Iterate 按钮开始解算。迭代结束后，结果保存为 sl7-3-euler.dat。
22. 执行 Display→Contours...命令，其压强云图与速度云图如图 7-93 和图 7-94 所示。

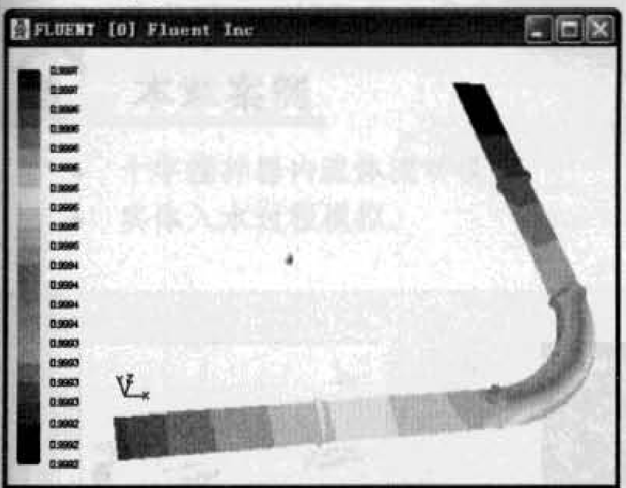


图7-93 欧拉模型计算出的压强云图

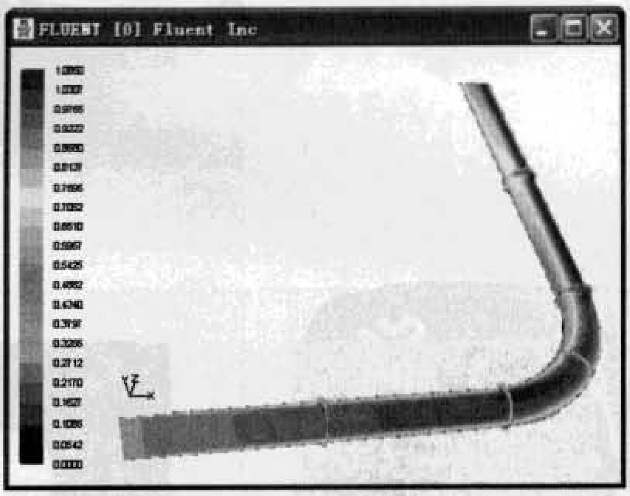


图7-94 欧拉模型计算出的速度云图

通过图 7-90 与图 7-93，图 7-91 与图 7-94 的比较可见，混合模型与欧拉模型计算得出的油水两相流弯管内的压强与速度分布基本相当，没有明显的区别。

注意：混合模型和欧拉模型都适用于流动中分散相的体积分数超过 10%的情形，本例的油水两相流动选择两个模型都适合。

23. 最后执行 File→Exit 命令，安全退出 FLUENT。

7.5 本章小结

本章主要讲述了多相流的概念、分类与 FLUENT 中的多相流模型及应用，详细介绍了 VOF 模型、混合模型与欧拉模型的使用范围与设置，通过三个实例帮助读者了解利用 FLUENT 求解多相流问题的操作思路，熟悉求解多相流问题的过程，为后续利用 FLUENT 解决实际工程中的多相流问题打下基础。

备忘录

- 相流的分类及应用。
- FLUENT 中的 VOF 模型、混合模型和欧拉模型。
- 利用 FLUENT 解决多相流问题的操作过程。

第 8 章
转动模型

对于单一物体运动或旋转时，我们可以采用坐标变换的方法来简化问题。然而，当多个物体之间存在相对旋转的时候，简单的转换参考坐标系已不能解决问题，如涡轮发动机、叶轮机械中静子和转子的干扰问题等，无论怎么设置参考系，都会遇到固体边界随时间变化的问题。这类问题可以利用 FLUENT 中相关的转动模型来解决。

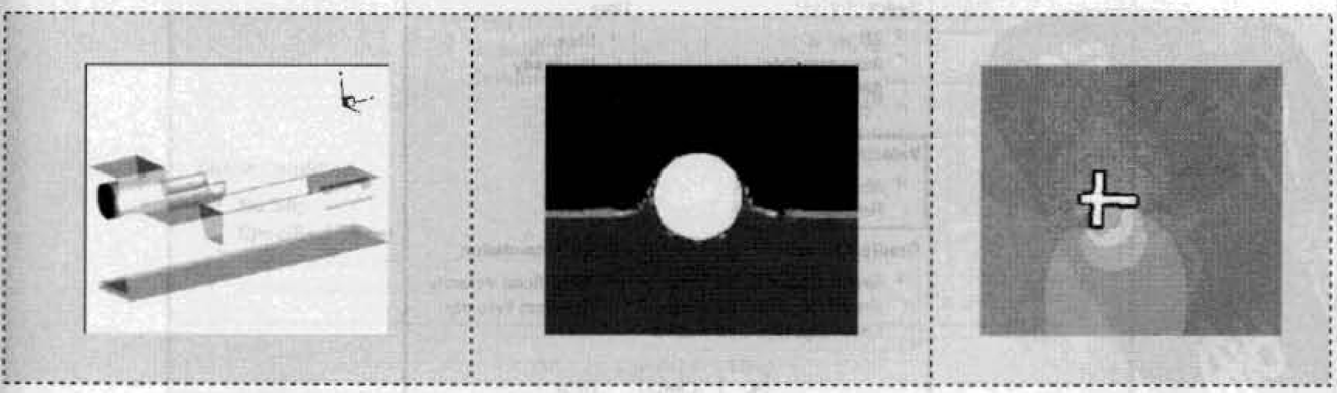
本章将详细介绍 FLUENT 中的动参考系模型、滑移网格模型及动网格模型用于模拟移动和变形区域的流体流动问题。通过十字搅拌器内流体流动模拟及实体入水过程模拟两个例子的讲解，帮助读者熟悉利用 FLUENT 模拟移动和变形区域流动问题的求解过程。

本章要点

- 动参考系模型。
- 滑移网格模型。
- 动网格模型。
- 转动模型的分析实例。

本章案例

- 十字搅拌器内流体流动模拟。
- 实体入水过程模拟。



8.1 动参考系模型

当计算区域中同时存在运动区域和静止区域或者存在多个静止、可动区域时，FLUENT 可以采用动参考系（MRF）模型、混合平面模型和滑动网格模型来解算。其中动参考系模型和混合平面模型可用于定常流动的计算，而 MRF 模型则是最简单的，因而也是最经济和常用的模型。

8.1.1 动参考系模型概述

动参考系模型是将不同旋转或移动速度的每个区域进行稳态近似，因此当边界上流动区域几乎均匀混合时，这种方法比较适宜。如转子和定子之间交互作用相对较弱的叶轮机械可以使用 MRF 模型，叶轮片交互作用相对较弱且无大范围瞬态影响的混合槽也可以使用 MRF 模型。但要精确模拟叶轮片的瞬态流场时，MRF 模型就无能为力了，而可以求助于滑动网格法。

MRF 模型的整个计算区域被分成多个小的子域，每个子域有各自的运动方式，或静止或旋转或平移。控制方程在每个子域内分别进行求解，在子域的交界面上则通过速度换算成绝对速度的形式进行各子域流场信息的交换。如果交界面上的网格是正则的，即两侧区域在交界面上共用相同的网格节点，其网格划分方法与常规方法一样。如果交界面上的网格是非正则的，即交界面两侧区域网格不一样且交界面是重合的两个面，分别属于不同的区域，这时交界面上的信息是通过插值相互传递的。

8.1.2 动参考系模型的设置

运用 MRF 模型时需要进行如下设置。

- 使用压力基求解器时，在 Solver 求解器对话框中设置速度的形式，如图 8-1 所示，选择是相对速度（Relative）还是绝对速度（Absolute），使用密度基求解器时只能用绝对速度。

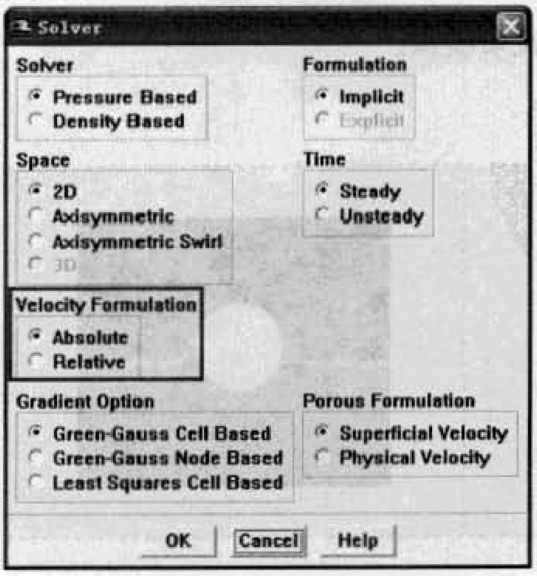


图8-1 设置求解器中的速度形式

- 在边界定义时，对于流体（Fluid）区域或固体（Solid）区域，设置相应的旋转轴原点和旋转方向。在运动类型（Motion Type）列表中选择运动参考系（Moving Reference Frame），并设置旋转速度（Rotational Velocity）或平移速度（Translational Velocity），如图 8-2 所示。

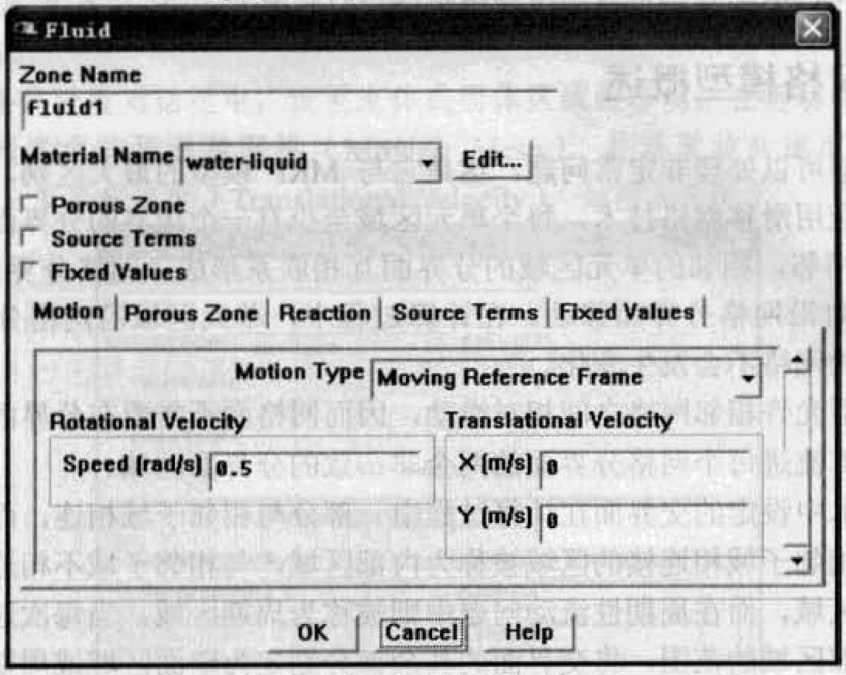


图8-2 区域运动设置（动参考系）

- 定义壁面运动方式及其速度，在 Wall 对话框的 Momentum 中选择 Moving Wall，设置壁面运动方式是旋转、平移或既旋转又平移，及定义旋转和平移的速度，如图 8-3 所示。

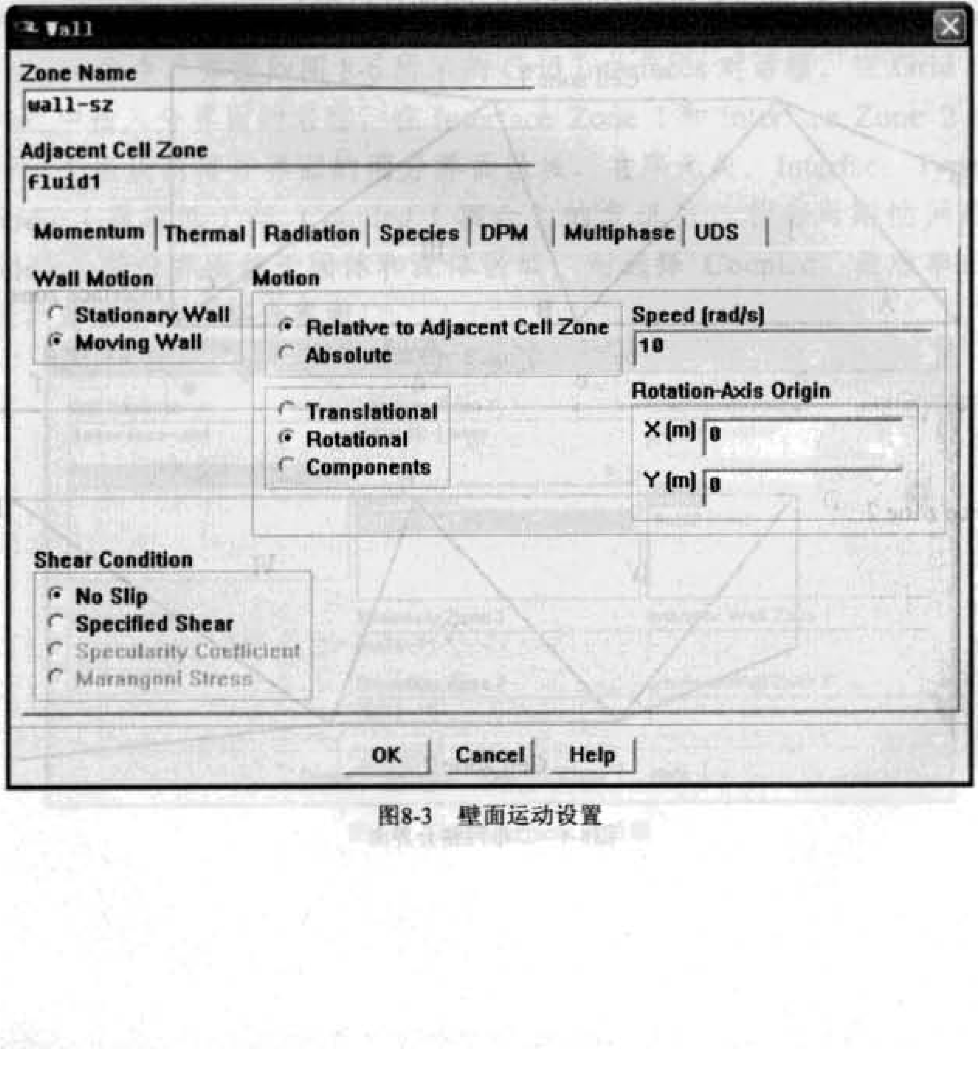


图8-3 壁面运动设置

8.2 滑移网格模型

滑移网格是在 MRF 和混合平面法基础上发展起来的，可以描述计算区域的运动。如会车、转子运动、风机运动等都可以用滑移网格法进行计算。

8.2.1 滑移网格模型概述

滑移网格模型可以处理非定常问题，这是它与 MRF 模型的最大区别。该模型在两个或更多的单元区域应用滑移网格技术，每个单元区域至少有一个边界的分界面，该分界面区域和另一单元区域相邻，相邻的单元区域的分界面互相联系形成“网格分界面”，这两个单元区域互相之间相对沿网格分界面移动。在计算过程中，单元区域沿网格分界面相互之间滑动，而两个区域的网格不会发生变化。

滑移网格模型允许相邻网格之间相对滑动，因而网格面不需要在分界面上排列，对于滑移网格关键是计算流进每个网格分界面的两个非一致的分界面区域。

滑移网格技术中设定的交界面在计算过程中一部分与相邻子域相连，而其余区域不与相邻子域相连。与相邻子域相连接的区域被称为内部区域，与相邻子域不相连的区域在平动问题中被称为壁面区域，而在周期性流动问题中则被称为周期区域。当每次迭代结束后，解算器会重新计算内部区域的范围，将交界面的其余部分划定为壁面区域或周期性区域，并在壁面区域或周期性区域上设定相应的边界条件。在新的迭代步上，只计算内部区域上的通量。

如图 8-4 所示，分界面区域由 A-B 面和 B-C 面以及 D-E 面和 E-F 面组成，交叉处产生 a-d 面、d-b 面、b-e 面和 e-c 面等。在两个单元区域重叠处产生 d-b 面、b-e 面和 e-c 面而组成内部区域，剩余的 a-d 面和 c-f 面形成成对的周期性区域。

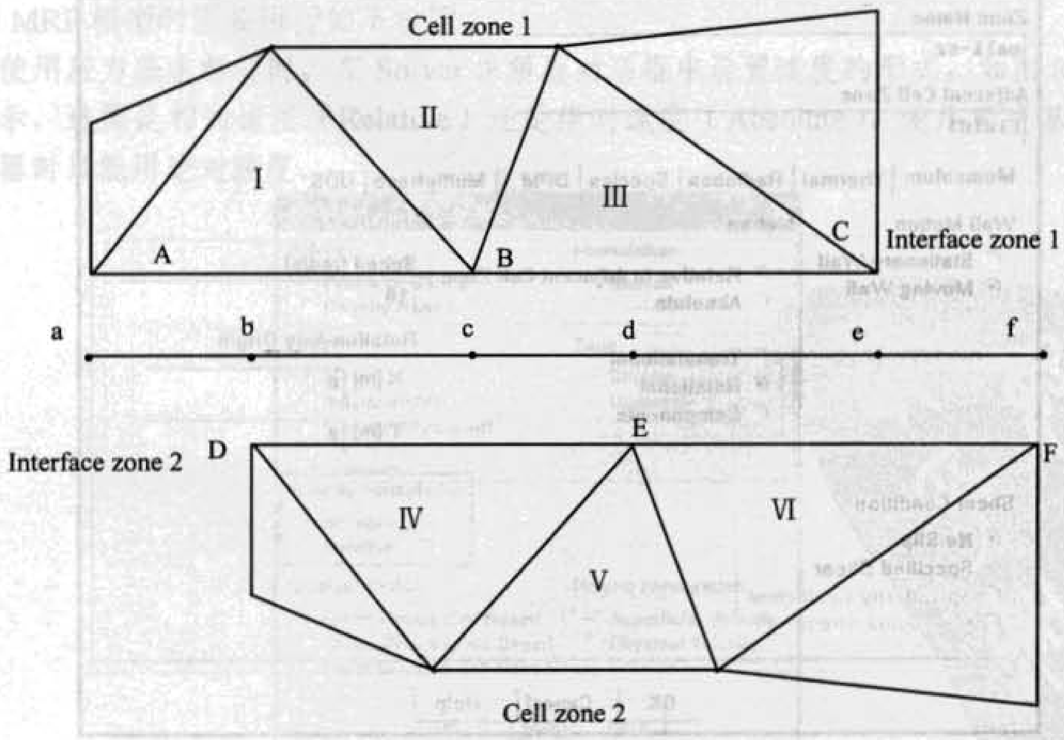


图8-4 二维网格分界面

8.2.2 滑移网格模型的设置

运用滑移网格模型时需要进行如下设置。

- 计算非定常时，激活非定常设置，即在 Solver 对话框中设置 Time 为 Unsteady。
- 在边界条件设置对话框中，设置流体或固体区域的移动，在运动类型（Motion Type）列表中选择滑移网格（Moving Mesh），并设置旋转速度（Rotational Velocity）或平移速度（Translational Velocity），如图 8-5 所示。

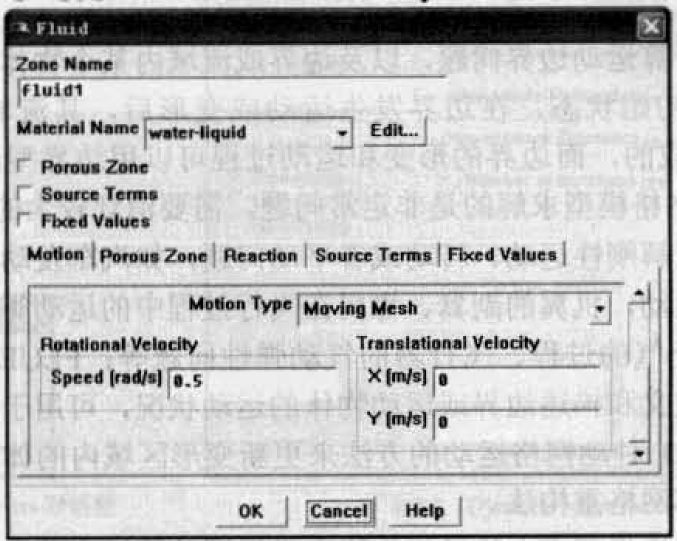


图8-5 区域运动设置（滑移网格）

- 定义壁面运动方式及其速度，与动参考系模型设置一样。
- 与动参考系不同的是滑移网格模型需要定义分界面，执行 Define→Grid Interfaces 命令，弹出如图 8-6 所示的 Grid Interfaces 对话框。在 Grid Interfaces 输入栏中输入分界面的名称，在 Interface Zone 1 和 Interface Zone 2 列表中各选择一个组成网格分界面的两分界面区域，次序无关。Interface Type 下方有 Periodic（周期性）与 Coupled（耦合）的复选框，若为周期性问题即选择 Periodic，若分界面位于固体和流体区域，则选择 Coupled。最后单击 Create 按钮，建立新的网格分界面。

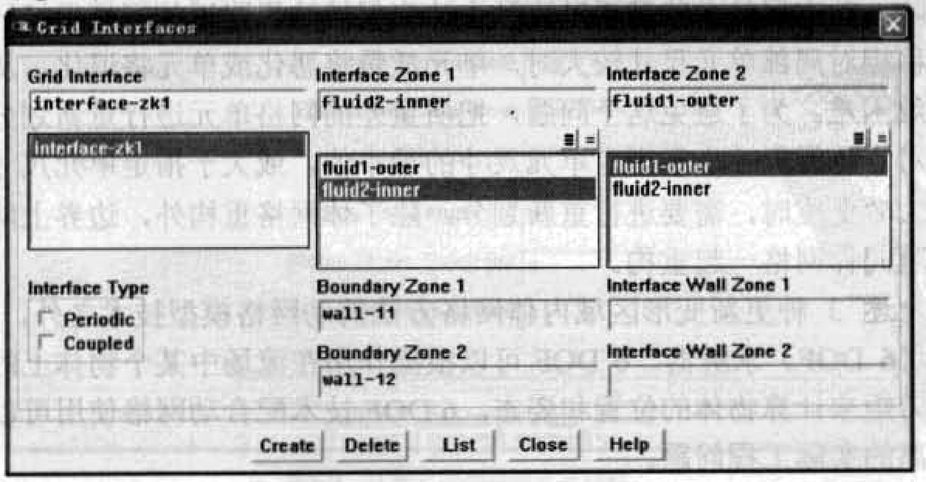


图8-6 Grid Interfaces 对话框

第 8 章 转动模型

8.3 动网格模型

动网格模型用于模拟由于流域边界运动引起流域形状随时间变化的流动情况。流动既可以是明确的运动（如具有明确的线速度或角速度），也可以是未知的运动（这种运动的绕物体重心的线速度或角速度是由流域中固体上的受力平衡得出的），下一时间步的运动情况是当前时间步的计算结果确定的。

8.3.1 动网格模型概述

动网格模型用于计算运动边界问题，以及边界或流域内某个物体的移动问题。在计算之前要先定义体网格的初始状态，在边界发生运动或变形后，其流域的网格重新划分是在FLUENT 内部自动完成的，而边界的形变和运动过程可以用边界型函数来定义，也可以用UDF 函数来定义。动网格模型求解的是非定常问题，需要消耗较大的硬件资源。

动网格模型可以求解刚性运动、转动或者平动问题，如汽车发动机气缸内活塞的往复运动，注射器中的活塞运动，机翼的副翼、襟翼在飞行过程中的运动等；还可以计算边界发生形变的问题，如气球充气的过程、飞行器的气动弹性问题等；FLUENT 提供的六自由度动网格模型求解器可以定义和描述边界或运动物体的运动状况，可用于解决多体分离过程。

FLUENT 提供了 3 种动网格运动的方法来更新变形区域内的体网格，分别为弹性光顺法、动态层技术和局部网格重构法。

弹性光顺法是根据边界节点上的已知位移来光滑调整流域内节点的位置。网格上任意两节点之间的连线被理想化成互相连接的弹簧。边界上任意一个网格节点的位移都会导致与之相互连接的弹簧中产生弹性力，进而导致临近网格节点上的力的平衡被打破，这样边界节点上的位移就通过体网格在流域中传播过去。经过反复迭代，最终整个弹簧网格系统达到新的平衡时，就可以得到一个变形后的、新的网格系统。

对于六面体网格、楔形网格等，动态层技术可以根据与运动的物面邻近的网格层的高度来决定增加或减小网格的层数。它在边界上假定一个优化的网格层高度，在边界移动、变形时，如果邻近边界的一层网格的高度大于优化高度一定比例时，就在边界面与相邻网格层之间增加一层网格。若邻近边界的一层网格的高度小于优化高度一定比例时，也会将邻近边界一层的网格删除。动态层技术就是通过这种方法来保持边界附近的网格保持一定的密度。

当边界位移相对局部单元尺寸较大时，单元质量将恶化或单元将退化，从而导致下一时间步的求解收敛困难。为了避免这个问题，把质量差的网格单元进行重新划分，这就是局部网格重构法。对于单元尺寸小于指定单元尺寸的最小值，或大于指定单元尺寸的最大值，或畸变度大于最大畸变度时，需要进行重新划分。除了体网格重构外，边界上网格的三角形面或线性面也将随同体网格一起重构。

除了具有上述 3 种更新变形区域内体网格方法的动网格模型技术之外，FLUENT 还提供了六自由度（6 DOF）求解器。6 DOF 可以根据作用在流场中某个物体上的重力、空气动力或其他力、力矩来计算物体的位置和姿态。6 DOF 技术配合动网格使用可以解决一些流固耦合、多体分离的实际工程问题。

8.3.2 动网格模型的设置

在 FLUENT 中进行动网格计算时，需要激活动网格计算模块，并进行相应的设置，其相关设置如下。

- 执行 Define→Dynamic Mesh→Parameters 命令，弹出如图 8-7 所示的 Dynamic Mesh Parameters 对话框，勾选 Dynamic Mesh 选项，对话框自动展开，如图 8-8 所示。



图8-7 Dynamic Mesh Parameters 对话框

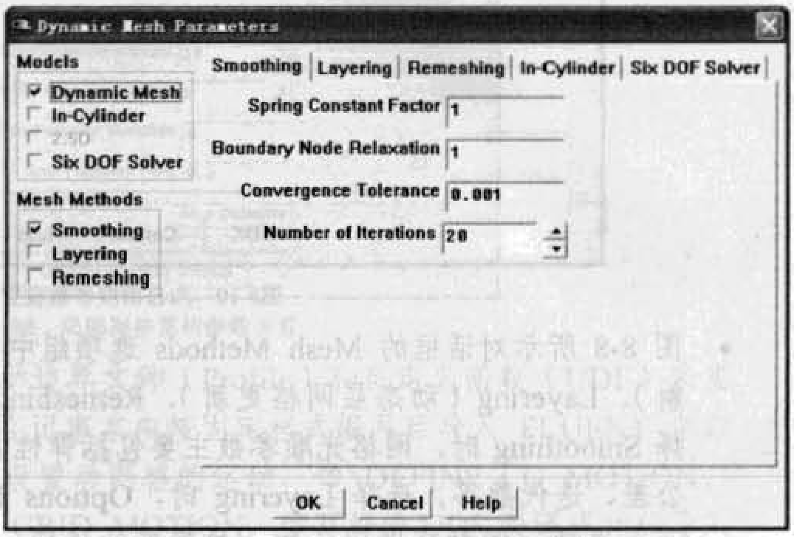


图8-8 Dynamic Mesh Parameters 对话框

- 图 8-8 所示对话框的 Models 选项组内有 Dynamic Mesh（动网格）、In-Cylinder（活塞内腔）、Six DOF Solver（六自由度）等选项，对于活塞腔内的往复运动，需要选择 In-Cylinder 选项，其参数设置对话框如图 8-9 所示，主要设置曲柄轴、曲柄轴起始角度、曲柄周期、活塞冲程等参数。对于如自由落体等六自由度问题，需要选择 Six DOF Solver 选项，其参数设置对话框如图 8-10 所示，主要设置重力加速度方向。

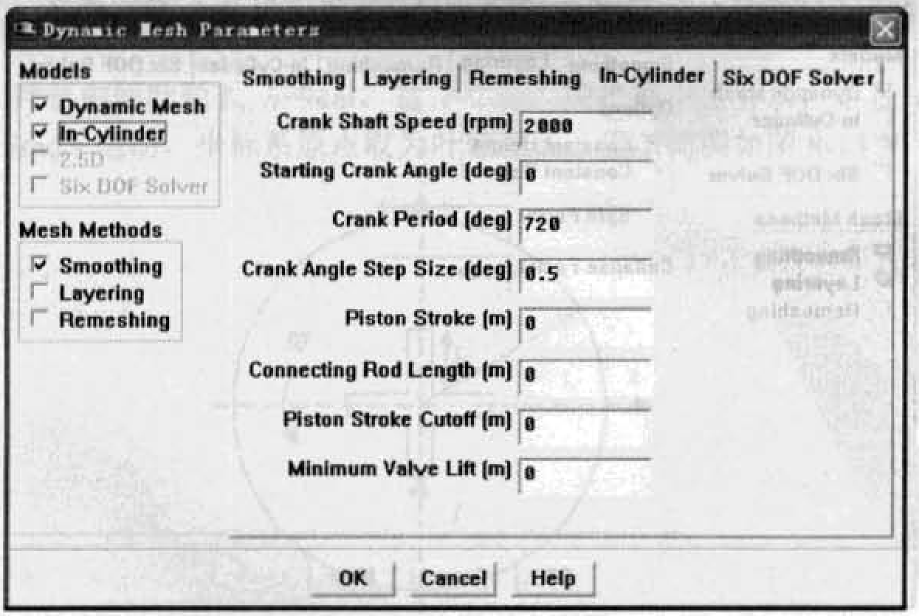


图8-9 活塞内腔参数设置对话框

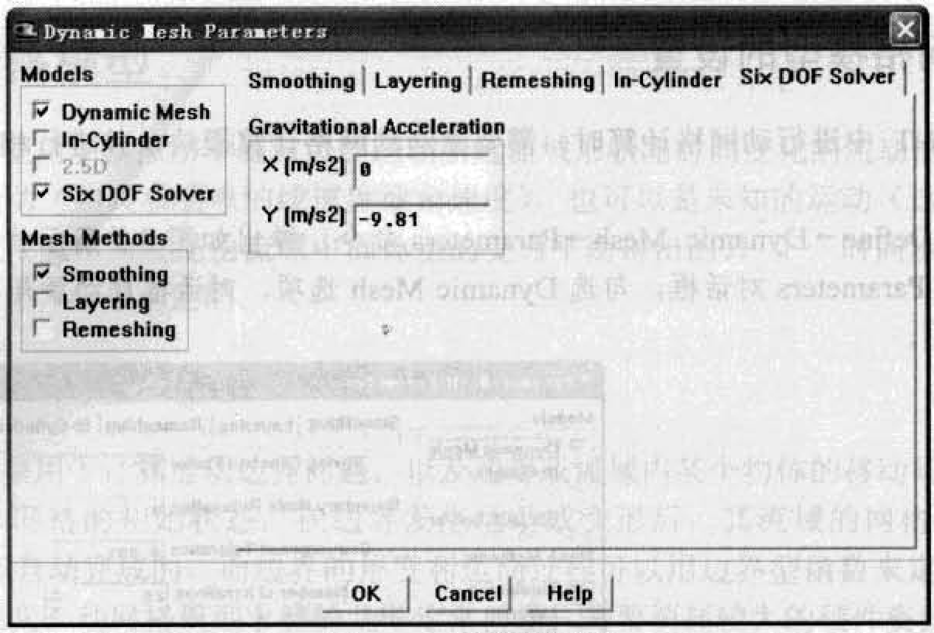


图8-10　六自由度参数设置

- 图 8-8 所示对话框的 Mesh Methods 选项组中有 Smoothing（弹性网格光顺更新）、Layering（动态层网格更新）、Remeshing（局部网格重构）等选项。选择 Smoothing 时，网格光顺参数主要包括弹性常数因子、边界节点松弛、收敛公差、迭代数等。选择 Layering 时，Options 选项中有常数高度和常数变化率两个选项，常数高度用于统一层高度的情况，而常数变化率用于有弯曲的区域，如图 8-11 所示。Split Factor 为分裂因子，0.4 表示网格高度超过理想高度 1.4 倍时发生分裂；Collapse Factor 为合并因子，0.04 表示压缩到理想高度的 0.04 倍时与邻近单元层合并。选择 Remeshing 时，Options 选项中有尺寸函数、必须改善扭曲、面重划分（仅对三维）3 个选项，其中，最小长度、最大长度比例及最大单元扭曲必须设定，而当采用尺寸函数时，还需要设置尺寸函数求解、尺寸函数的变化率等参数，如图 8-12 所示。

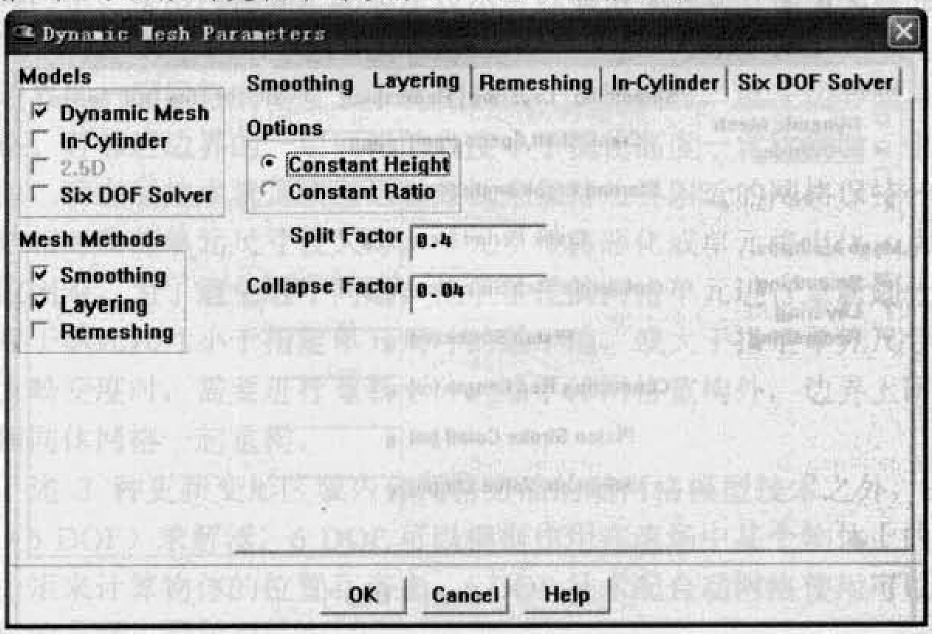


图8-11　动态层技术参数设置

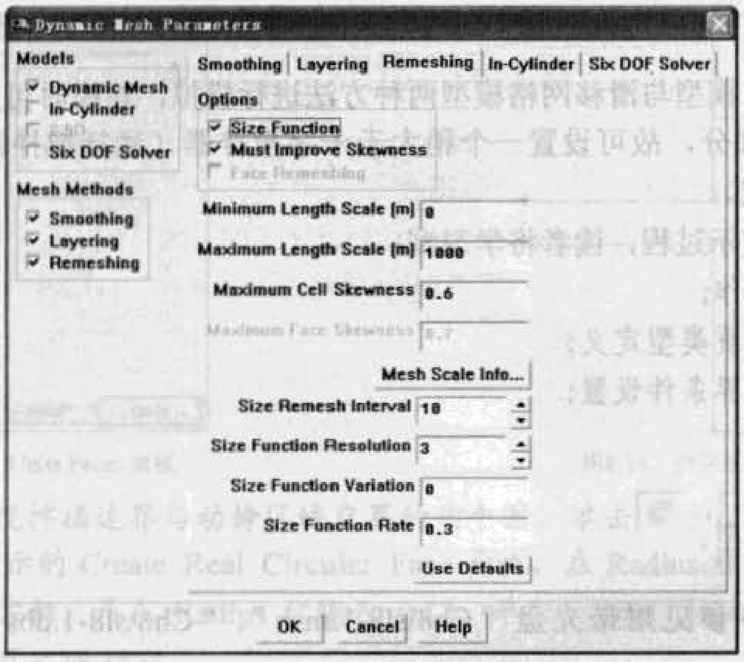


图8-12 局部网格重构参数设置

- 动边界的运动方式可以采用动边界文件（Profile）和自定义函数（UDF）来实现。其中，动边界文件只需在记事本中按固定格式编写后导入 FLUENT 中即可。UDF 主要有 3 个宏来设置动网格的运动，即 DEFINE_CG_MOTION、DEFINE_GEOM 和 DEFINE_GRID_MOTION，编写好的 UDF 编译成功后导入 FLUENT 即可实现所需运动。

【实例 8-1】：十字搅拌器内流体流动模拟

在工程实际中，经常涉及到搅拌的问题。那么经过搅拌后容器内流体的流动情况如何，搅拌速度设置为多少才能达到我们预期的效果，这些都是工程中所面临的实际问题。下面我们针对十字搅拌器内的流体流动运用转动模型进行模拟，通过采用 MRF 模型与滑移网格模型分别模拟以帮助读者熟悉两种方法的求解过程与差异。

一、实例概述

二维十字搅拌器中间叶轮长 h=9cm，宽 l=2cm，搅拌桶中盛有水，半径 r=0.5m，搅拌器以角速度 ϖ =5rad/s 运动，坐标系原点取为叶轮中心，模型简图如图 8-13 所示。



图8-13 十字搅拌器模型简图

思路分析

本例利用 MRF 模型与滑移网格模型两种方法进行模拟，建模时可以将计算区域分解成动区域与静区域两部分，故可设置一个稍大于十字搅拌器（涵括搅拌器）的圆面作为动区域，剩下的为静区域。

通过本实例的演示过程，读者将学习到：

- 面域布尔操作；
- 动静区域介质类型定义；
- 转动模型边界条件设置；
- 交界面定义；
- MRF 模型；
- 滑移网格模型。

结果文件——参见附带光盘“Ch8\sl8-1.msh”、“Ch8\sl8-1.dbs”、“Ch8\sl8-1.jou”、“Ch8\sl8-1.trn”、“Ch8\sl8-1-mrf.cas”、“Ch8\sl8-1-mrf.dat”、“Ch8\sl8-1-sm.cas”、“Ch8\sl8-1-sm.dat”。

动画演示——参见附带光盘“Ch8\AVI\sl8-1.avi”。

二、模型建立

1. 双击 GAMBIT 的桌面快捷方式，启动 GAMBIT。
2. 首先建立十字搅拌器的模型，搅拌器可以看成是两个矩形合并而成，矩形的长应为 $2h+l$，宽即为 l，故单击 → → ，在 Create Real Rectangular Face 面板的 Width 和 Height 栏分别输入 0.2 和 0.02，单击 Apply 按钮，再输入 0.02 和 0.2，单击 Apply 按钮，生成如图 8-14 所示的交叉的两个矩形，矩形的中点与原点重合。

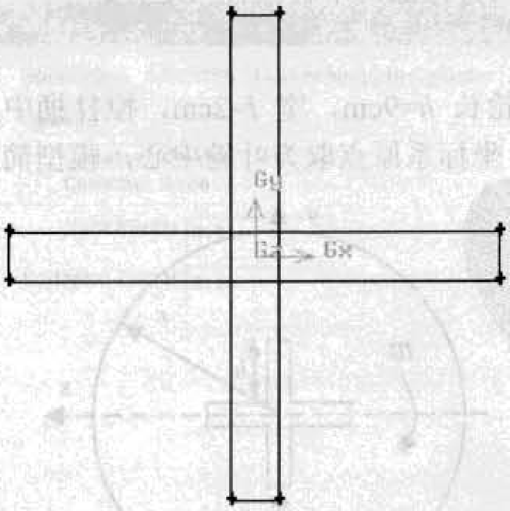


图8-14　十字交叉矩形

3. 将两个交叉矩形合并为一个面域，单击 Face 面板中的 按钮，在弹出的如图 8-15 所示的 Unite Faces 面板中选取刚建好的两个矩形面，单击 Apply 按钮将两个矩形合并，如图 8-16 所示。

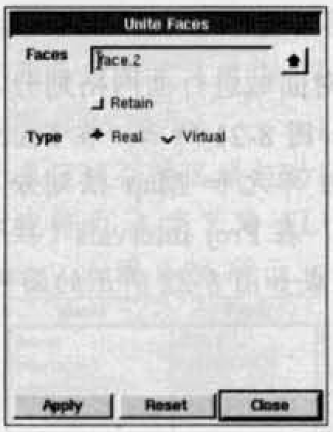


图8-15 Unite Faces 面板

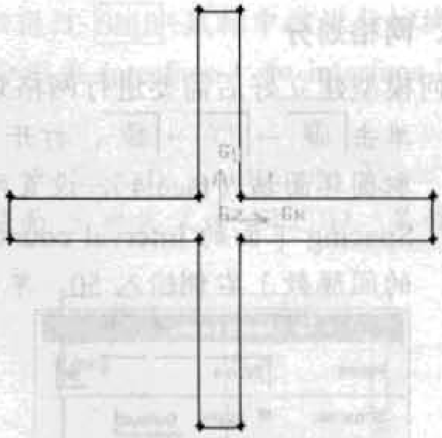


图8-16 合并后的搅拌器面域

4. 下面创建搅拌桶边界与动静区域交界的两个圆，单击 → → ，弹出如图 8-17 所示的 Create Real Circular Face 面板，在 Radius 栏先输入 0.5，单击 Apply 按钮。再在 Radius 栏输入 0.12，单击 Apply 按钮，此时视图窗口的显示如图 8-18 所示。

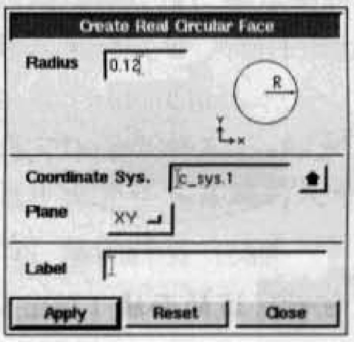


图8-17 Create Real Circular Face 面板

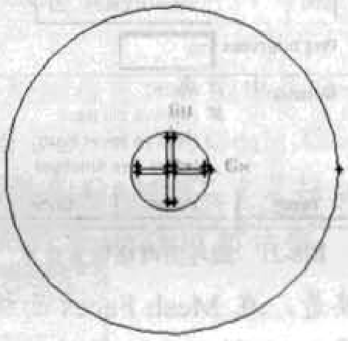


图8-18 圆形面域的绘制

5. 接下来就是进行面域的布尔操作。单击 Face 面板中的 按钮，在弹出面板的第一行 Face 中选取 face.4（大圆面域），在第二行 Faces 中选取 face.5（小圆面域），并按下 Retain 按钮（保留小圆面域），如图 8-19 所示，单击 Apply 按钮，完成布尔减操作。此时的图形窗口与图 8-18 一样，但是大圆面域已经被剪成一个圆环了。

6. 用十字搅拌器面域去减小圆面域，同样在 Subtract Real Faces 面板的第一行 Face 中选取 face.5（小圆面域），在第二行 Faces 中选取 face.1（十字搅拌器面域），这里不需按下 Retain 按钮，单击 Apply 按钮，此时的几何模型渲染效果如图 8-20 所示。

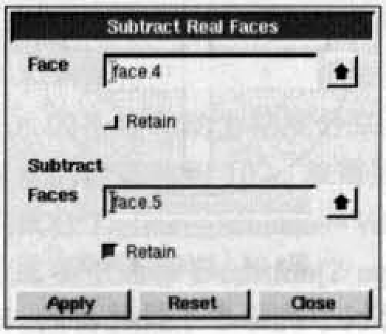


图8-19 Subtract Real Faces 面板

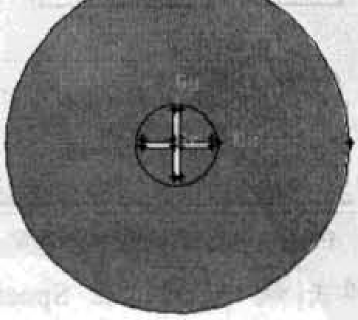


图8-20 几何模型渲染效果

三、网格划分

几何模型建立好后需要进行网格划分，本例可以直接对面域进行面网格划分。

1. 单击 → → ，打开 Mesh Faces 面板，如图 8-21 所示。在 Faces 中选取圆环面域（face.4），设置网格划分方式为 Quad 单元和 Map 法划分，选择 Spacing 下面的 Interval count，并在左侧输入 200，在 Proj Intervals（径向划分的间隔数）右侧输入 50，单击 Apply 按钮，生成如图 8-22 所示的面网格。

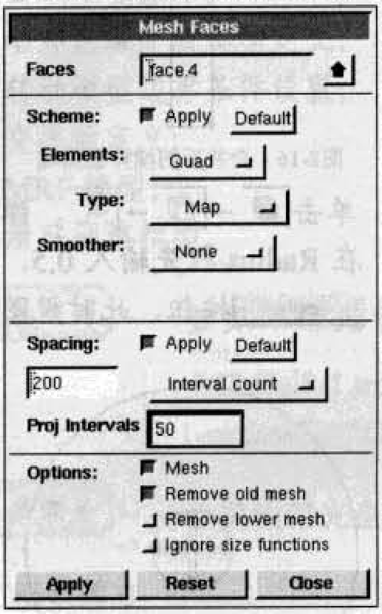


图8-21　圆环面网格划分设置

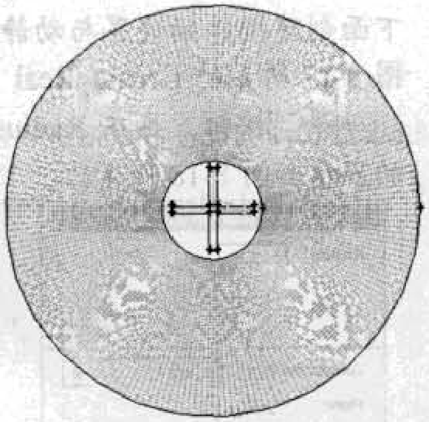


图8-22　圆环面网格

2. 接着，在 Mesh Faces 面板的 Faces 中选取中间表征动区域的面域（face.5），如图 8-23 所示。运用的网格划分方式为 Quad 单元和 Pave 法划分，选择 Spacing 下面的 Interval size，并在左侧输入 0.005，单击 Apply 按钮，生成如图 8-24 所示的面网格。

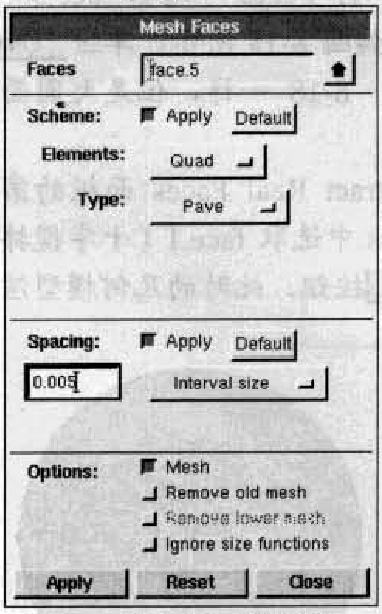


图8-23　动区域面网格划分设置

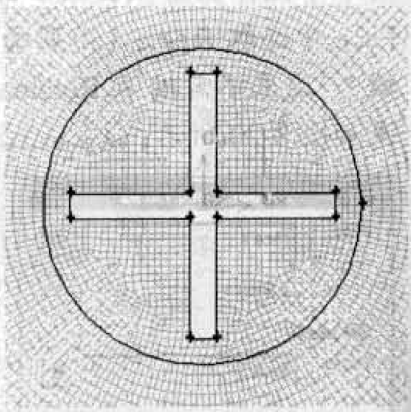


图8-24　动区域面网格

3. 单击 → ，在 Specify Boundary Types 面板中选择十字搅拌器的 12 条边，将它们定义为 WALL 边界，名称为 jbq-w。然后选择圆环与动区域交界的

两条边，这里的两条边是重合在一起的，可以通过 Shift+鼠标中键进行切换，将两条边都定义为 INTERFACE 边界，名称分别为 interface-1 和 interface-2，如图 8-25 所示。

4. 计算区域分静区域与动区域。单击 → ，在 Specify Continuum Types 面板中将面 4 定义为 FLUID，名称为 jing，将面 5 也定义为 FLUID，名称为 dong，如图 8-26 所示。

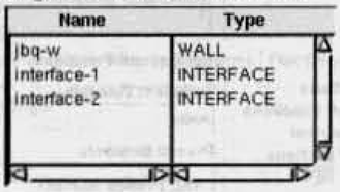


图8-25　边界类型的定义

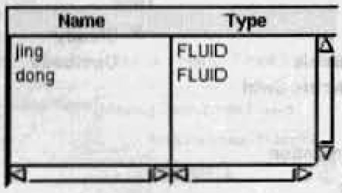


图8-26　区域介质类型定义

5. 最后执行 File→Export→Mesh 命令，将网格输出为 sl8-1.msh。

四、求解计算

1. 启动 FLUENT 二维单精度计算器，执行 File→Read→Case...命令，读入划分好的网格文件"sl8-1.msh"。
2. 执行 Grid→Check 命令，对网格进行检测，成功检测后窗口界面中最后一行出现"Done"语句。执行 Grid→Scale...命令，在图 8-27 所示的 Scale Grid 对话框中设置计算区域的尺寸和单位制。由于本例模型在 GAMBIT 中是按 m 生成的，故保持默认设置即可，直接单击 Close 按钮关闭 Scale Grid 对话框。

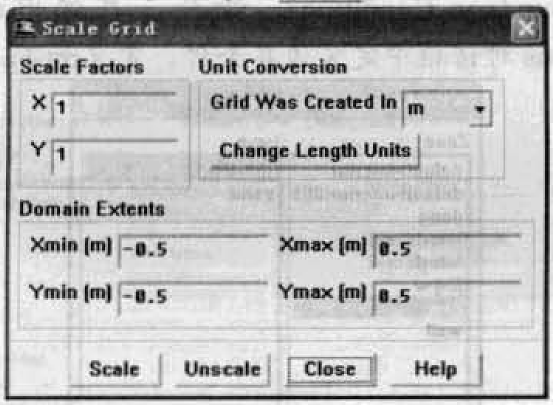


图8-27　Scale Grid 对话框

下面分 MRF 模型和滑移网格模型两种方法进行介绍。

MRF 模型计算

1. 执行 Define→Models→Solver...命令，弹出如图 8-28 所示的 Solver 对话框，本例保持默认设置，单击 OK 按钮。

由于水的密度和动力粘度分别为 998.2kg/m^3 和 0.001003kg/（m·s），在 5rad/s 的角速度下，旋转水的雷诺数约 10^4，故需要启动湍流模型。

2. 执行 Define→Models→Viscous...命令，弹出 Viscous Model 对话框，在 Model 选项中选择 k-epsilon[2 eqn]，在 k-epsilon Model 选项下选择 Standard，保留其他默认设置，如图 8-29 所示，单击 OK 按钮。

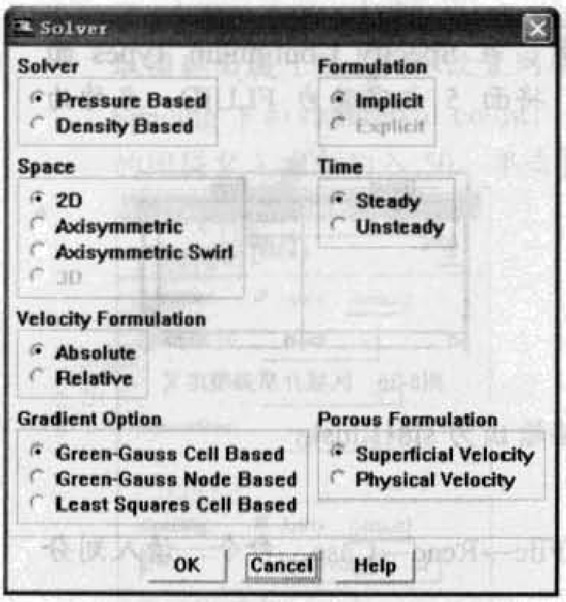


图8-28　基本求解器设置

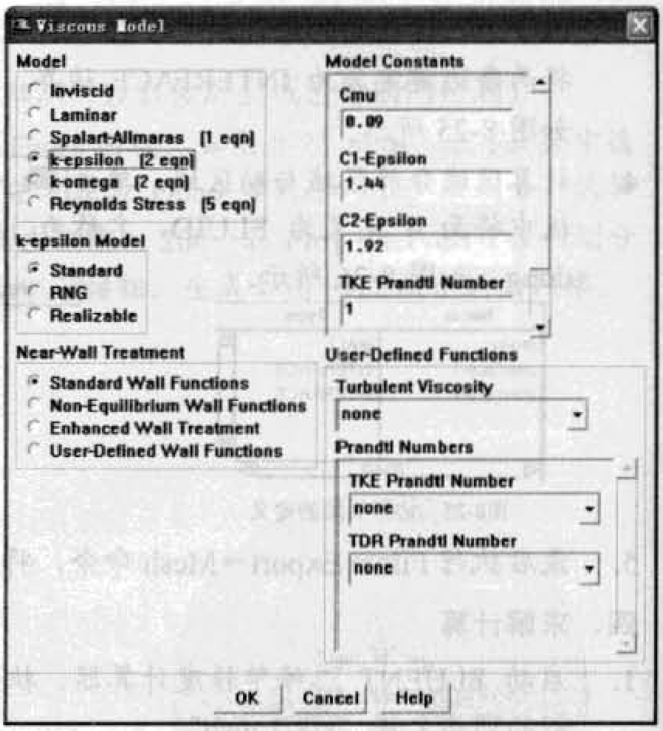


图8-29　湍流模型设置

3. 参照前面介绍的方法，定义流动的材料——水，完成材料物性的定义。
4. 下一步设置计算的环境。执行 Define→Operating Conditions 命令，打开 Operating Conditions 对话框。本例保持为默认设置，单击 OK 按钮。
5. 执行 Define→Boundary Conditions…命令，在弹出的如图 8-30 所示的 Boundary Conditions 对话框中定义边界条件，定义如下。

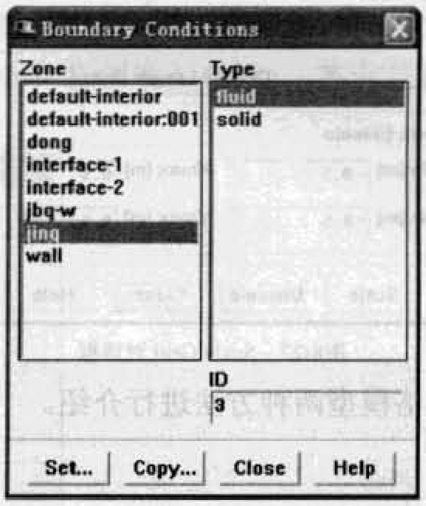


图8-30　边界条件定义对话框

- 在左边的 Zone 栏选中 jing，其 Type 为 fluid，单击 Set... 按钮，打开如图 8-31 所示的 Fluid 对话框。在对话框的 Material Name 下拉列表中选择 water-liquid，单击 OK 按钮。即设置静区域内的流体为水。
- 在左边的 Zone 栏选中 dong，其 Type 也为 fluid，单击 Set... 按钮，打开如图 8-32 所示的 Fluid 对话框。在对话框的 Material Name 下拉列表中同样选择 water-liquid，与上面设置不同的是，这里需要选择 Motion 中 Motion Type 为 Moving Reference Frame，即启用 MRF 模型，在 Rotational Velocity 的

Speed[rad/s]栏输入 5，单击 OK 按钮。即设置动区域内的流体为水，且以 5rad/s 的角速度在旋转。

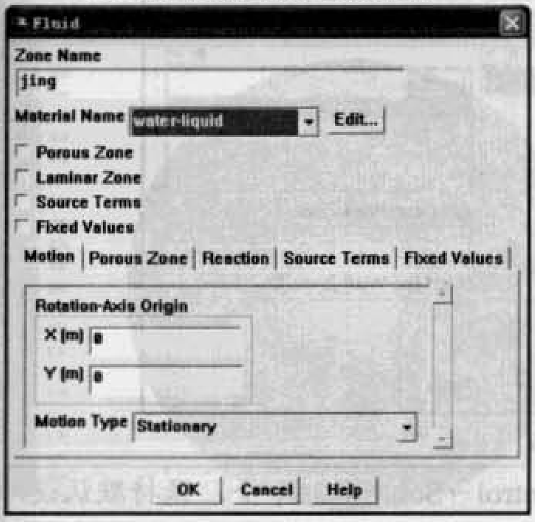


图8-31 静区域流体设置

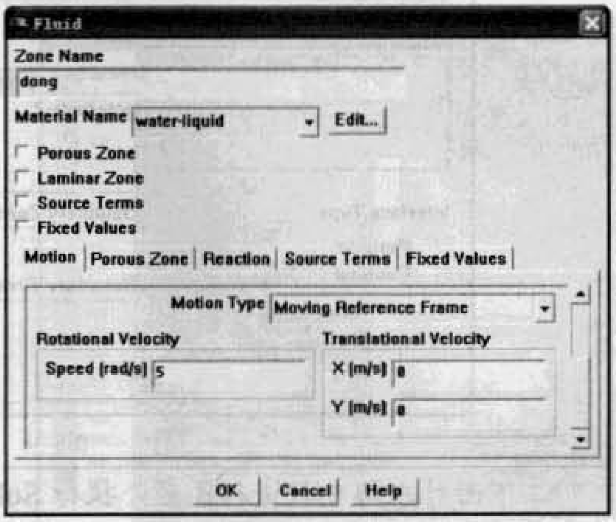


图8-32 动区域流体设置

- 在左边的 Zone 栏选中 jbq-w，其 Type 为 wall，单击 Set... 按钮，打开如图 8-33 所示的 Wall 对话框。在对话框的 Momentum 下选择 Wall Motion 中的 Moving Wall，并选择 Motion 下方的 Relative to Adjacent Cell Zone 和 Rotational，保持 Speed[rad/s]和 Rotation-Axis Origin 的 X[m]、Y[m]为 0，单击 OK 按钮，即定义十字搅拌器叶轮与邻近的区域一起以 5rad/s 同步转动。

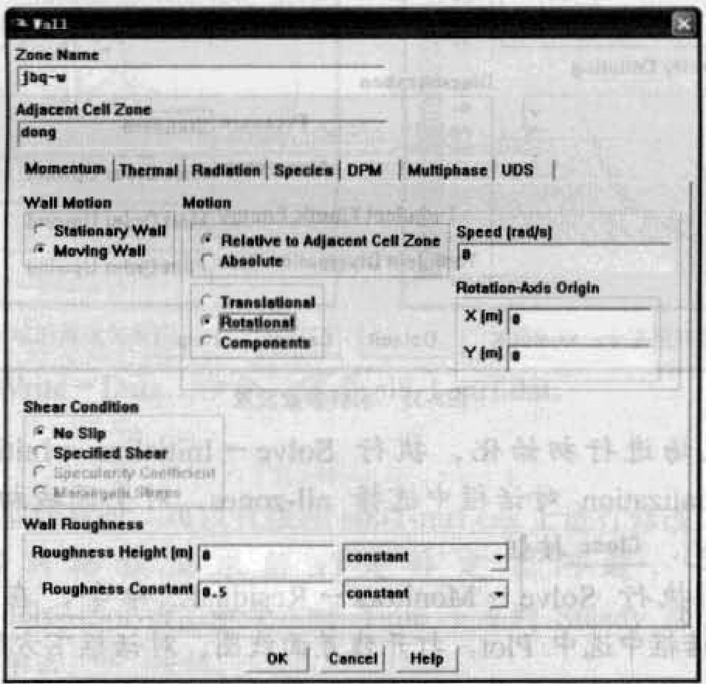


图8-33 十字搅拌器壁面设置

6. 除了定义以上边界之外，还要定义交界面。执行 Define→Grid Interfaces...命令，弹出如图 8-34 所示的 Grid Interfaces 对话框，在 Grid Interface 输入栏中输入名称 jiaojie，在 Interface Zone 1 列表中选择 interface-1，在 Interface Zone 2 列表中选择 interface-2，单击 Create 按钮创建交界面。

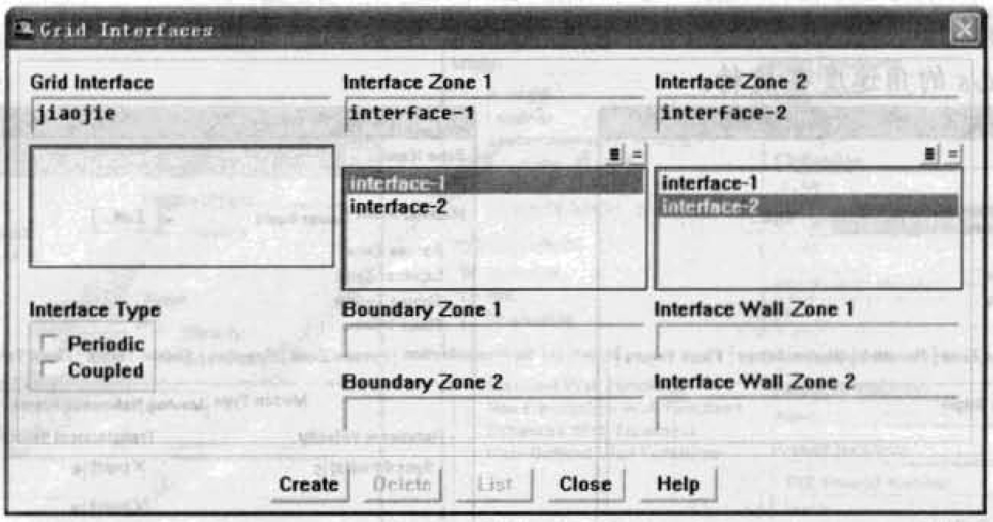


图8-34　交界面设置

7. 下面对求解参数进行设置。执行 Solve→Control→Solution...命令，保持默认设置，如图 8-35 所示，单击 OK 按钮。

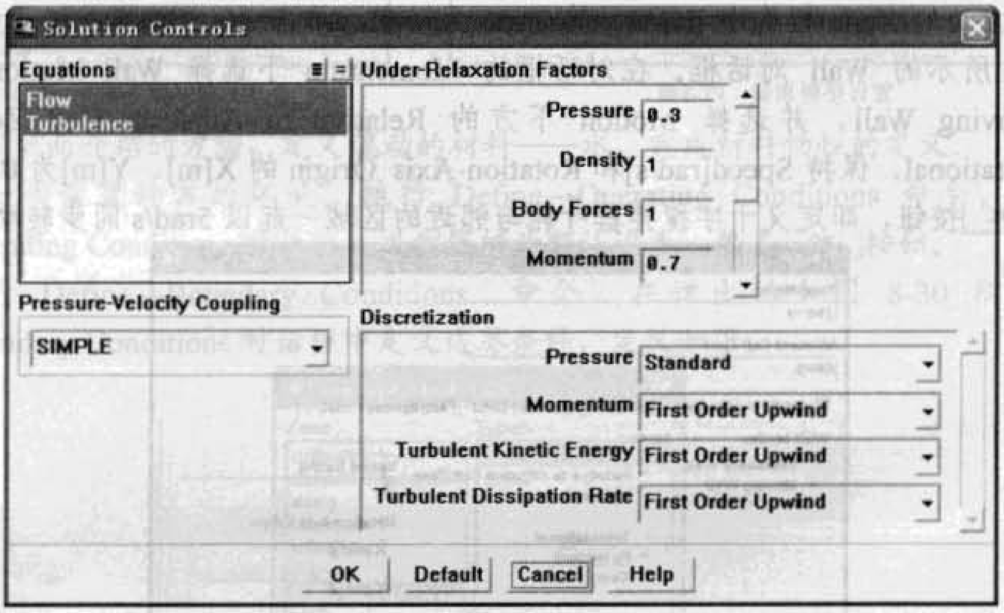


图8-35　求解参数设置

8. 接下来对流场进行初始化。执行 Solve→Initialize→Initialize...命令，在 Solution Initialization 对话框中选择 all-zones，对全区域初始化，顺序单击 Init 、Apply 、Close 按钮。

9. 初始化后，执行 Solve→Monitors→Residual...命令，在弹出的 Residual Monitors 对话框中选中 Plot，打开残差曲线图。对话框下方的 Criteria 中可以输入各参数的收敛精度要求，FLUENT 默认为 0.001，本例设为 0.0001，单击 OK 按钮。

10. 完成上述步骤的设置后，执行 File→Write→Case...命令，将工程文件保存为 sl8-1-mrf.cas。

11. 执行 Solve→Iterate...命令，设置迭代步为 1000，单击 Iterate 按钮开始解算。

12. 计算完后，执行 Display→Contours...命令，选择 Contours of 下拉列表中的 Velocity...和 Vorticity Magnitude，执行 Display→Vectors...命令，选取 Vectors

of 下方列表中的 Velocity，可以分别看到搅拌桶内与十字搅拌器周围的流速分布，如图 8-36 至图 8-39 所示。

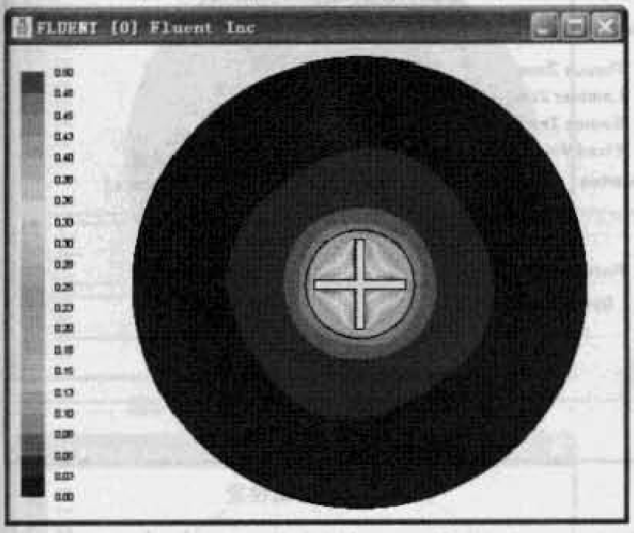


图8-36 全区域的流速分布云图

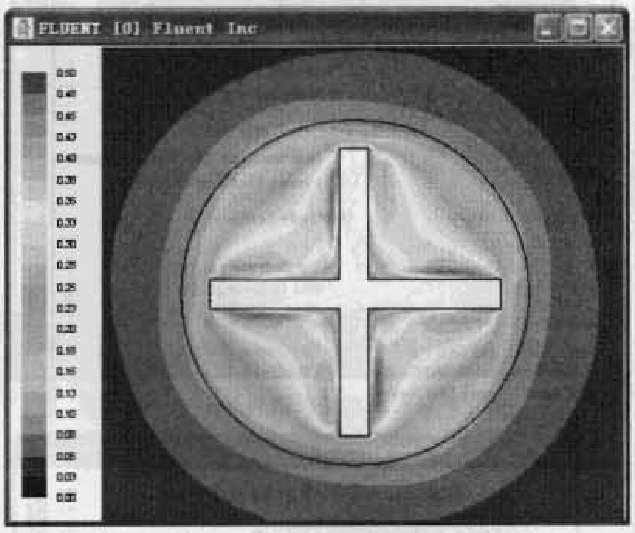


图8-37 十字搅拌器周围的流速分布云图

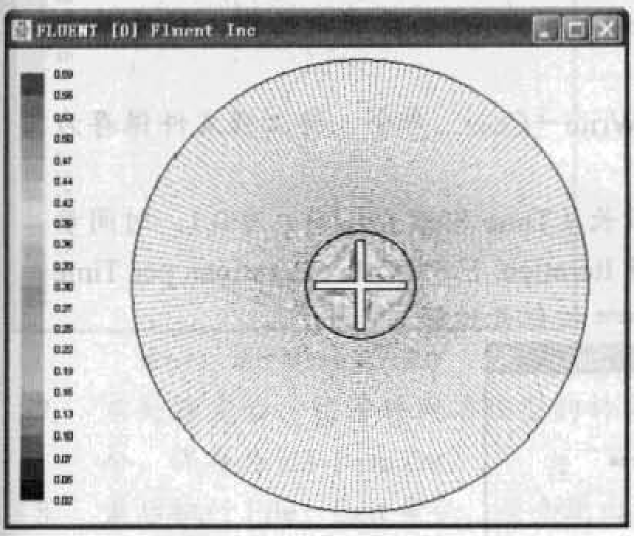


图8-38 全区域的流速矢量图

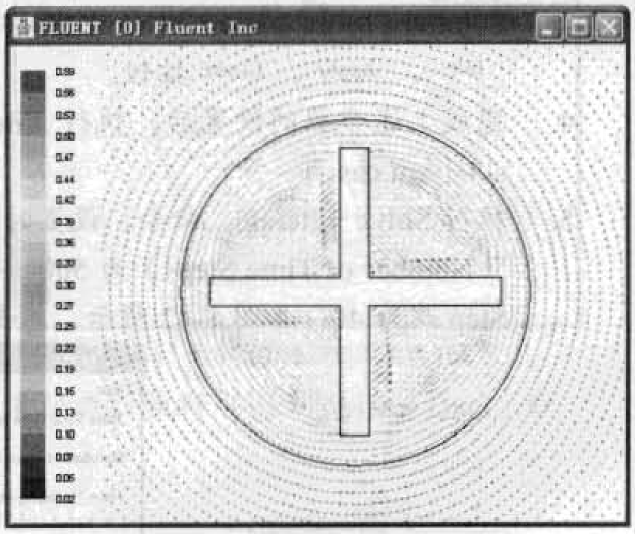


图8-39 十字搅拌器周围的流速矢量图

13. 执行 File→Write→Data...命令，保存 sl8-1-mrf.dat。

滑移网格模型计算

利用滑移网格模型计算时，可以直接在 sl8-1-mrf.cas 上进行修改。

1. 由于滑移网格模型求解的是非定常问题，所以首先执行 Define→Models→Solver...命令，将 Time 下方的 Steady 改为 Unsteady，如图 8-40 所示，单击 OK 按钮。
2. 需要改变动区域的流体定义，执行 Define→Boundary Conditions...命令，在左边的 Zone 栏选中 dong，单击 Set... 按钮，打开如图 8-41 所示的 Fluid 对话框。在对话框的 Material Name 下拉列表中选择 water-liquid，选取 Motion 中 Motion Type 为 Moving Mesh，启用滑移网格模型，并在 Rotational Velocity 的 Speed[rad/s]中输入 5，单击 OK 按钮。

其他边界定义、交界面、求解参数的定义与 MRF 模型设置均相同，这里不用重复设置。

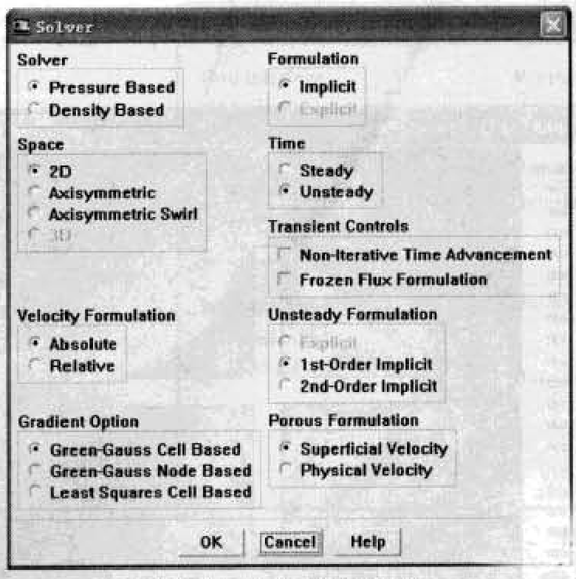


图8-40　基本求解器设置

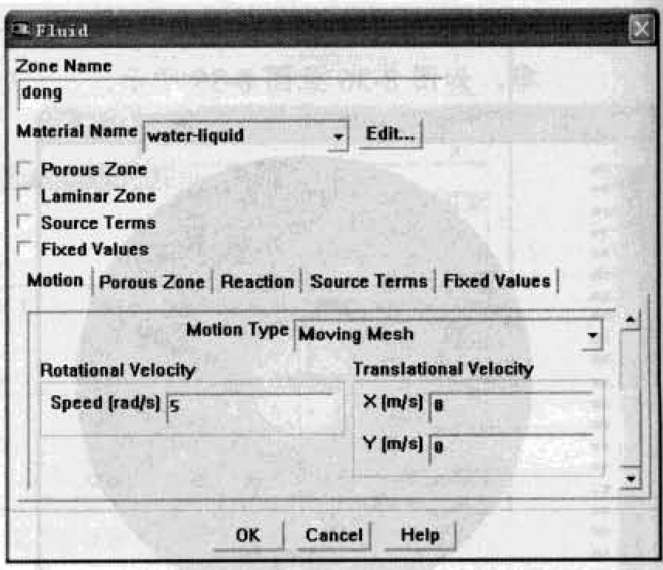


图8-41　动区域设置

3. 接下来对流场再次初始化。执行 Solve→Initialize→Initialize...命令，在 Solution Initialization 对话框中选择 all-zones，对全区域初始化，顺序单击 Init 、Apply 、Close 按钮。

4. 完成上述步骤的设置后，执行 File→Write→Case...命令，将工程文件保存为 sl8-1-sm.cas。

5. 执行 Solve→Iterate...命令，设置时间步长（Time Step Size[s]）为 0.1，时间步（Number of Time Steps）为 500，并将 Iteration 下方的 Max Iterations per Time Step 改为 40，如图 8-42 所示，单击 Iterate 按钮开始解算。

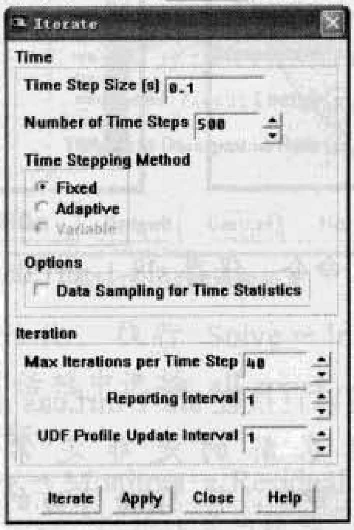


图8-42　迭代设置

注意：FLUENT 默认的 Max Iterations per Time Step 为 20，这里将其改为 40 是为了保证每个迭代步的收敛性。

6. 与 MRF 模型计算完后的后处理一样，执行 Display→Contours...命令，选择 Contours of 下拉列表中的 Velocity...和 Velocity Magnitude，执行 Display→Vectors...命令，选取 Vectors of 下方列表中的 Velocity，分别查看搅拌桶内与十字搅拌器周围的流速分布，如图 8-43 至图 8-46 所示。



图8-43　全区域的流速分布云图

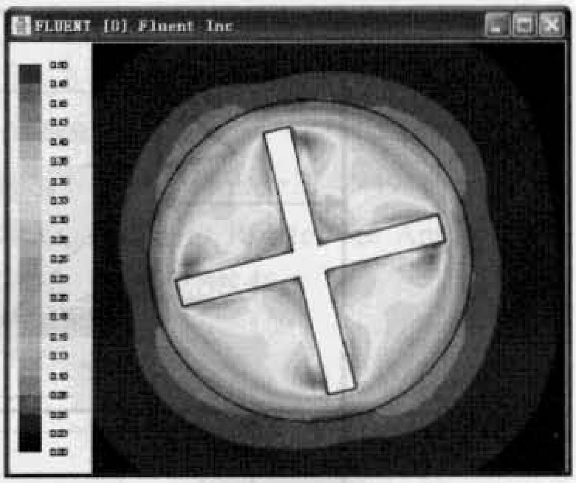


图8-44　十字搅拌器周围的流速分布云图

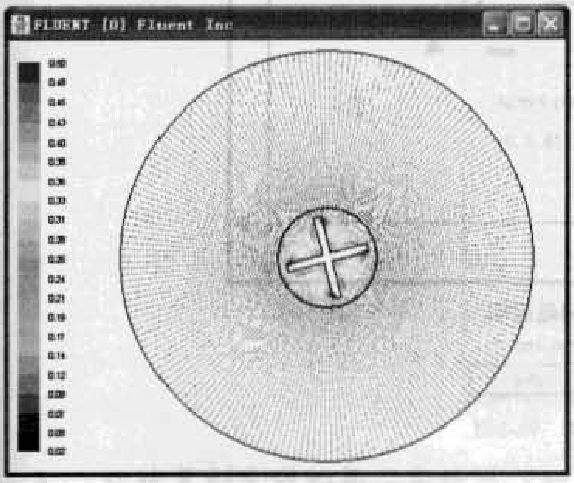


图8-45　全区域的流速矢量图

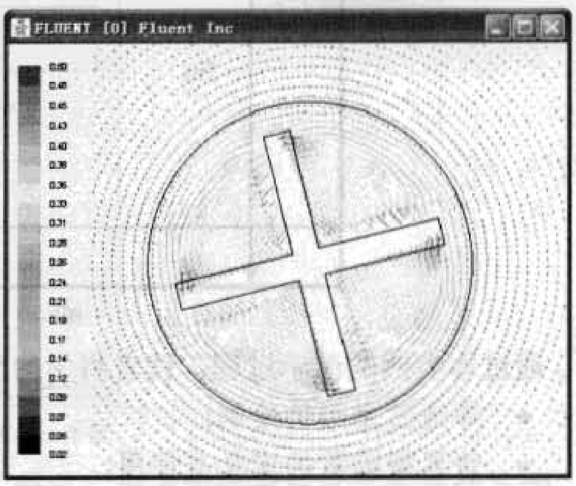


图8-46　十字搅拌器周围的流速矢量图

7. 后处理完后，将滑移网格模型的计算结果保存，执行 File→Write→Data...命令，保存为 sl8-1-sm.dat。
8. 最后执行 File→Exit 命令，安全退出 FLUENT。

【实例 8-2】：实体入水过程模拟

在日常生活与工程中，经常遇到实体入水的问题。例如，跳水运动员以一定速度入水，怎样才能使得入水时水面溅起的水花最小？这也是运动员比赛成绩好坏的关键之一。下面我们利用动网格模型来模拟实体入水的过程。

一、实例概述

如图 8-47 所示，边长为 0.4m 的一个等边三角形实体，初始时刻为静止放置，突然以 60° 角向右下方运动，在 0.1s 内实体加速到 200m/s，之后为匀速运动。下方计算区域的水深为 5m，宽为 10m。

思路分析

本例采用动网格模型，等边三角形实体周围的网格要发生不断的变化，建模时需要在实体外围画一层近似边界层的网格区域跟随实体一起运动。根据问题的实际情况，本例应该采用动网格模型中的 Smoothing 和 Remeshing。除采用动网格模型外，还需用到多相流中的 VOF 模型。

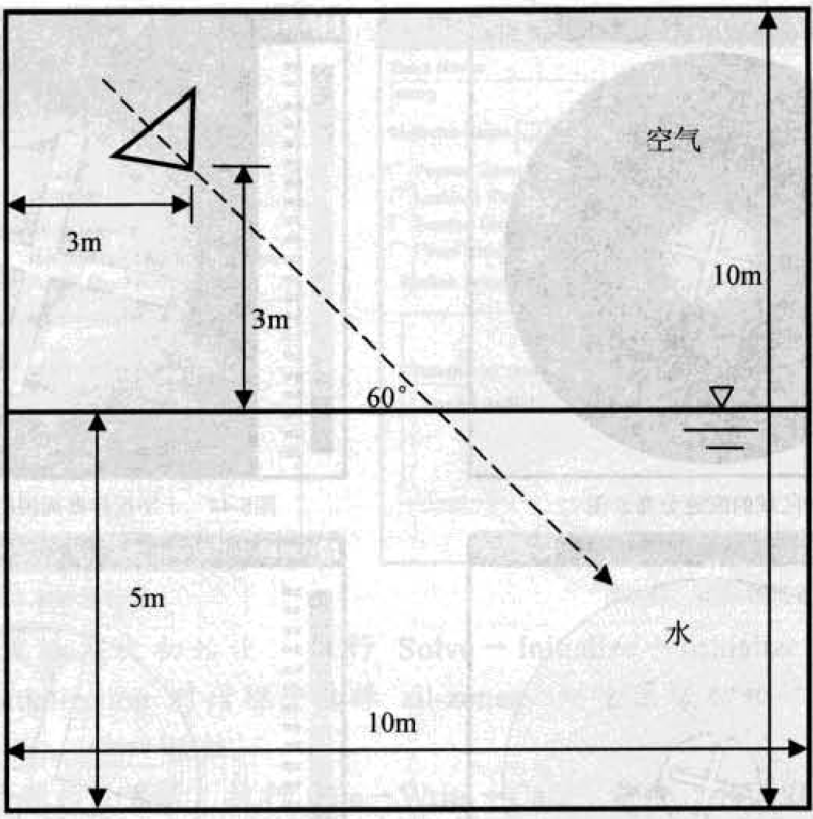


图8-47 实体入水问题简图

通过本实例的演示过程，读者将学习到：

- 等边三角形的绘制；
- 边界型函数的定义与使用；
- 动网格模型；
- Smoothing 设置；
- Remeshing 设置；
- 网格预览；
- 动画设置与回放。

结果文件——参见附带光盘“Ch8\sl8-2.msh”、“Ch8\sl8-2.dbs”、“Ch8\sl8-2.jou”、“Ch8\sl8-2.trn”、“Ch8\sl8-2.cas”、“Ch8\sl8-2.dat”、“Ch8\dong.txt”、“Ch8\dm.gif”。

动画演示——参见附带光盘“Ch8\AVI\sl8-2.avi”。

二、模型建立

1. 启动 GAMBIT，首先建立等边三角形。单击 → → ，在 Create Real Vertex 面板的 x、y、z 坐标输入栏中输入（0，0，0），单击 Apply 按钮生成第一个点，按同样方法建立点（0.4，0，0）。然后单击 → → ，在 Create Straight Edge 面板中选择点 1（Vertix.1）与点 2（Vertix.2），连接这两点生成线段，如图 8-48 所示。

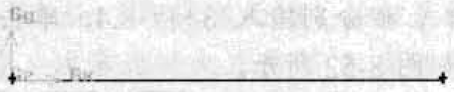


图8-48　生成的第一条线段

2. 单击 Edge 面板中的（Move/Copy Edges）按钮，弹出如图 8-49 所示的面板，选择线段 1，单击 Copy 按钮，并选择 Operation 为 Rotate，在 Angle 栏输入 60，默认（0，0，0）→（0，0，1），单击 Apply 按钮。

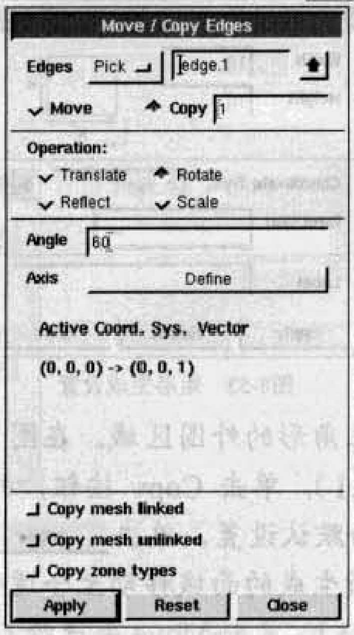


图8-49　Move/Copy Edges 面板

3. 旋转复制生成的第二条线段，如图 8-50 所示，剩下的一条线段只需连接右侧两点即可。
4. 单击 → → ，在 Create Face from Wireframe 面板中利用 Shift+鼠标左键框选等边三角形的 3 条边，然后单击 Apply 按钮创建面，此时的等边三角形如图 8-51 所示。

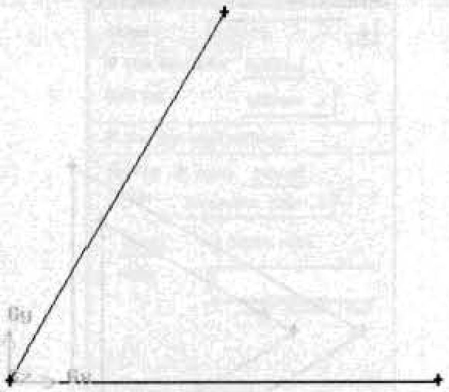


图8-50　旋转生成第二条线

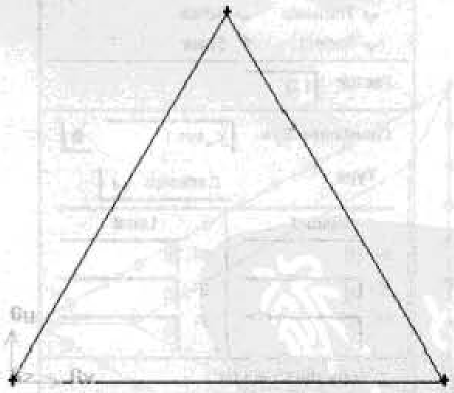


图8-51　建立的等边三角形

5. 三角形面域所在的位置并不对，首先需将其旋转 210°。单击 Face 面板中的（Move/Copy Edges）按钮，在 Move/Copy Edges 面板中，选择面 1（face.1），单击 Move 并选择 Operation 为 Rotate，在 Angle 栏输入 210，默认（0，0，0）→（0，0，1），单击 Apply 按钮。其次，需要将三角形平移，在 Move/Copy Edges 面板中，选择面 1（face.1），单击 Move 并选择 Operation

为 Translate，在 x 与 y 栏分别输入 3 和 8.4，单击 Apply 按钮完成平移操作。此时的视图窗口如图 8-52 所示。

6. 下面生成整个计算区域的矩形。单击 → → ，在图 8-53 所示的 Create Real Rectangular Face 面板的 Width 和 Height 栏分别输入 10 和 10，并选择 Direction 为+X+Y（表示以坐标原点为矩形在左下角进行绘制），单击 Apply 按钮，生成的矩形如图 8-54 所示。



图8-52 旋转与移动后的三角形面域

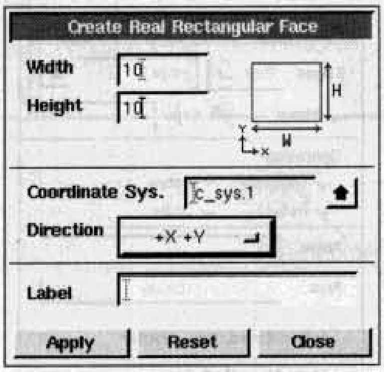


图8-53 矩形生成设置



图8-54 生成的矩形面

7. 至此，还需要绘制包裹三角形的外围区域。在图 8-55 所示的 Move/Copy Faces 面板中，选择面 1（face.1），单击 Copy 按钮，并选择 Operation 为 Scale，设置 Factor 为 1.5，其余为默认设置，单击 Apply 按钮，生成一个放大了的三角形面域。然后将这个新生成的面域移动至合适位置，即在 Move/Copy Faces 面板中，选择面 3（face.3），单击 Move 并选择 Operation 为 Translate，在 x 与 y 栏分别输入-1.45 和-4.1，单击 Apply 按钮，此时的两个三角形位置如图 8-56 所示。

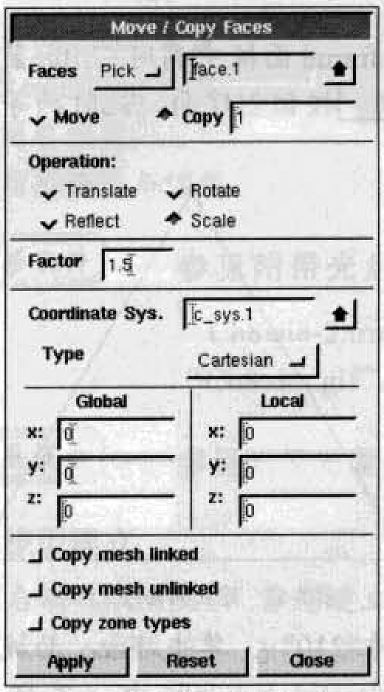


图8-55 三角形放大复制

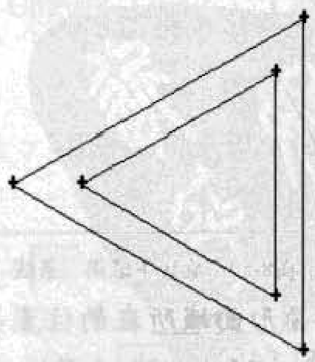


图8-56 两个三角形的位置

8. 单击 Face 面板中的 按钮，在图 8-57 所示的 Subtrace Real Faces 面板的第一行 Face 中选取面 2（大矩形面），在第二行 Faces 中选取面 3（放大的三角形

面），并单击下方的 Retain（即保留面 3）按钮呈红色显示，单击 Apply 按钮，完成布尔减操作。注意此时大三角形 3 条边都含有重合的边，需要单击按钮，将两条重合的线合并成一条。

9. 下面利用按钮将两三角形对应的顶点相连，然后单击→→，将两三角形间的空隙处建立成 3 个梯形面域，如图 8-58 所示。

10. 至此，大、小三角形面域都已不再需要，故单击按钮，选择面 1 和面 3，单击 Apply 按钮删除。剩下面 2、面 4、面 5 和面 6。

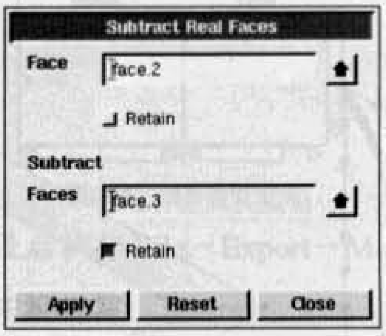


图8-57　面域布尔减操作

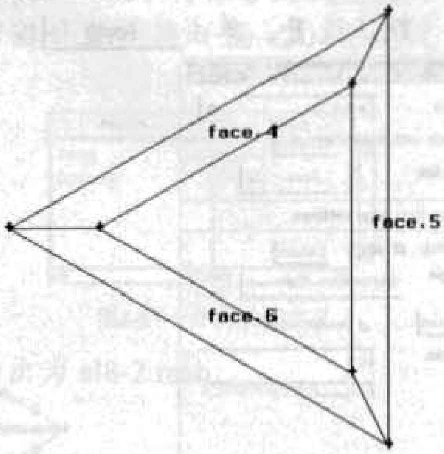


图8-58　建立 3 个梯形面域

三、网格划分

几何模型建立完后需要进行网格划分，本例在三角形外围加了一个区域用于模拟边界层网格，且该区域要跟随三角形一起运动。

1. 首先对代表该区域的面 4 至面 6 进行网格划分。单击→→，弹出如图 8-59 所示的 Mesh Edges 面板。在 Edges 中选取大三角形的 3 条边，运用 Interval size 划分方法，并在左侧输入 0.05，单击 Apply 按钮，生成如图 8-60 所示的线网格。

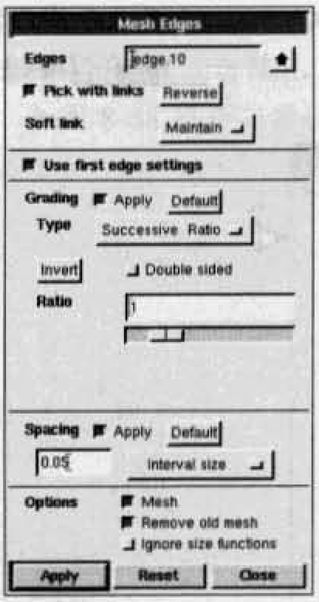


图8-59　线网格划分

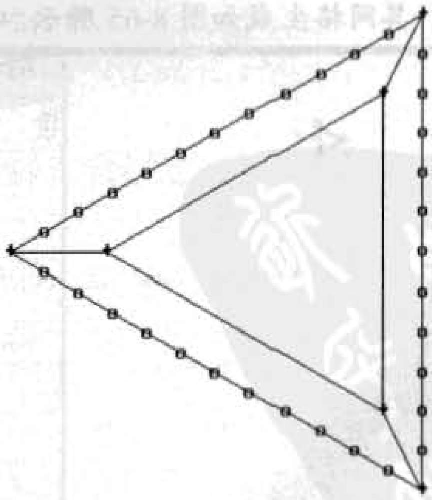


图8-60　三角形边的线网格

2. 然后对连接两个三角形的 3 条边进行划分，仍然在 Mesh Edges 面板中进行相

关操作。如图 8-61 所示，在 Edges 中选择两三角形顶点的 3 条连线，选择时注意线上红色箭头的指向，应均为大三角形顶点指向小三角形的顶点，若方向相反可以通过鼠标中键进行更换。选择完后设置 Ratio 为 0.9，以 Interval count 的方式进行划分，并在左侧输入 10，即划分为 10 个间隔，单击 Apply 按钮生成这 3 条边的线网格，如图 8-62 所示。

3. 梯形面的线网格划分好后，单击 → → ，打开 Mesh Faces 面板，选取这 3 个面，运用 Quad 单元与 Map 方法对该面进行面网格划分，保留其他默认设置，单击 Apply 按钮即可，其网格生成如图 8-63 所示。

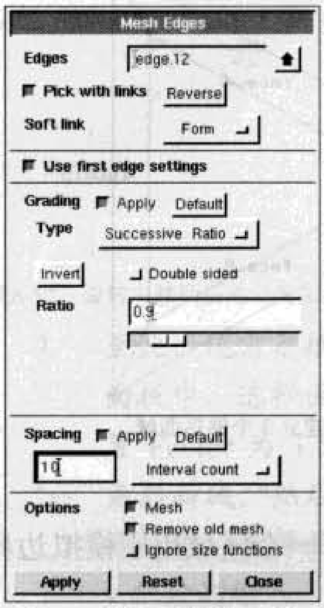


图8-61 渐变线网格划分设置

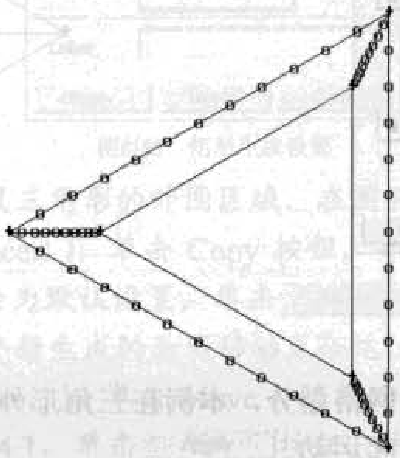


图8-62 渐变线网格

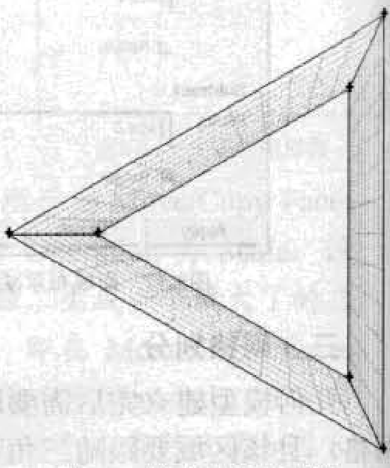


图8-63 梯形面域的面网格

4. 接下来对外围计算区域进行网格划分，首先对大矩形区域的 4 条边进行线网格划分，在 Edges 中选取矩形的 4 条边，运用 Interval size 划分方法，并在左侧输入 0.1，单击 Apply 按钮，生成如图 8-64 所示的线网格。

5. 单击 → → ，在 Mesh Faces 面板中选取该面，运用 Tri 单元与 Pave 方法对该面进行面网格划分，保留其他默认设置，单击 Apply 按钮即可，其网格生成如图 8-65 所示。

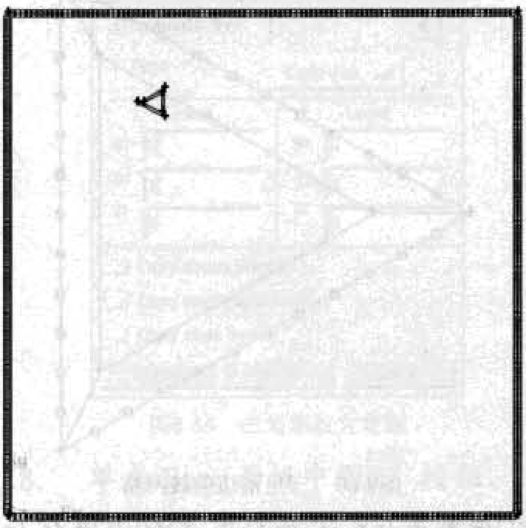


图8-64 矩形面的线网格

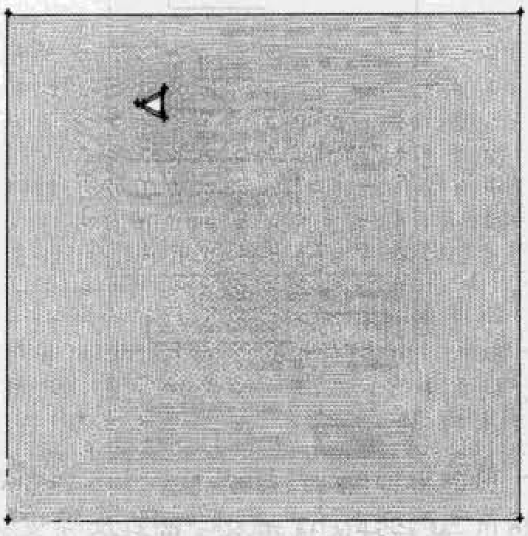
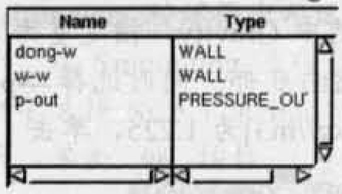


图8-65 矩形区域的面网格

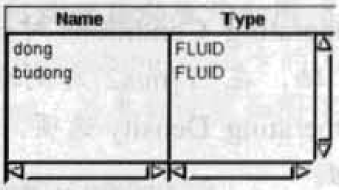
至此完成了 4 个面的网格划分，下面定义边界与介质类型。

6. 单击 → ，在 Specify Boundary Types 面板中将小三角形的 3 条边定义为壁面边界（WALL），名称为 dong-w，将矩形区域的左、右、底 3 条边也定义为壁面边界（WALL），名称为 w-w，将矩形区域的上边定义为压力出口（PRESSURE_OUTLET），名称为 p-out，如图 8-66 所示。
7. 由于本例涉及与三角形实体一起运动的面域，故需将其单独进行介质类型定义，单击 → ，在 Specify Continuum Types 面板中将梯形面域（面 4 至面 6）定义为 FLUID，名称为 dong，将外围计算区域（面 2）也定义为 FLUID，名称为 budong，如图 8-67 所示。



Name	Type
dong-w	WALL
w-w	WALL
p-out	PRESSURE_OU

图8-66 边界类型定义



Name	Type
dong	FLUID
budong	FLUID

图8-67 介质类型定义

8. 最后执行 File→Export→Mesh 命令，将网格输出为 sl8-2.msh。

四、求解计算

1. 启动 FLUENT 二维单精度计算器，执行 File→Read→Case...命令，读入划分好的网格文件“sl8-2.msh”。网格读入之后，执行 Grid→Check 命令，检查网格的信息，待最后一行出现“Done”语句。
2. 执行 Grid→Scale...命令，弹出 Scale Grid 对话框，由于在 GAMBIT 中是按照 m 为单位 1:1 建立的几何模型，本例不需要重新定义网格的尺寸，单击 Close 按钮关闭该对话框。
3. 执行 Define→Models→Solver...命令，弹出 Solver 对话框，选中 Time 下方的 Unsteady，启用非定常计算，其余保持默认，单击 OK 按钮。
4. 执行 Define→Models→Multiphase...命令，在弹出的 Multiphase Model 对话框中选择 Volume of Fluid，Multiphase Model 对话框自动展开，保持默认参数设置，如图 8-68 所示，单击 OK 按钮，关闭该对话框。

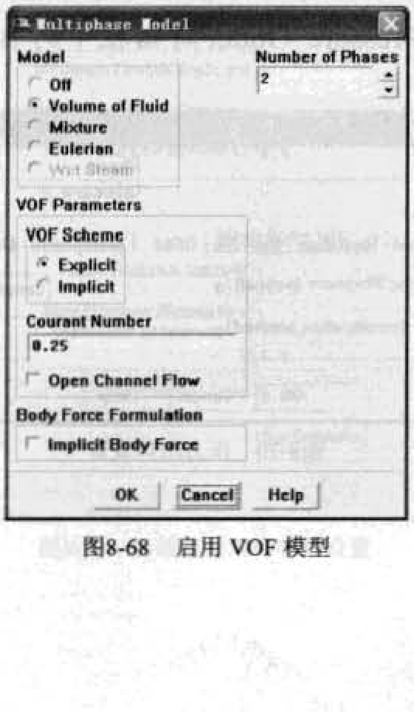


图8-68 启用 VOF 模型

5. 参照前面介绍的方法，材料——水，完成材料物性的定义。
6. 接下来定义基本相和第二相。执行 Define→Phases…命令，在 Phase 列表中选择 phase-1，在 Type 选项中选择 primary-phase，然后单击 Set... 按钮，在打开对话框的 Phase Material 列表中选择 air，并在 Name 文本框中输入 air 代替原来的 phase-1，单击 OK 按钮。在 Phase 列表中选择 phase-2，在 Type 选项中选择 secondary -phase，单击 Set... 按钮，在打开对话框的 Phase Material 列表中选择 water-liquid，并在 Name 文本框中输入 water 代替原来的 phase-2，单击 OK 按钮。
7. 相定义完后设置操作环境。执行 Define→Operating Conditions 命令，打开 Operating Conditions 对话框。如图 8-69 所示，选中 Gravity，指定重力方向为 y 轴，在 Y[m/s2]右侧输入-9.81，即重力方向指向底部。同时选择 Specified Operating Density 选项，保持 Operating Density[kg//m3]为 1.225，单击 OK 按钮。

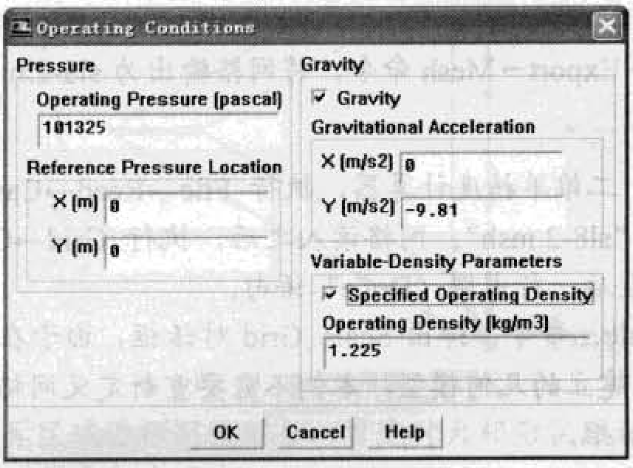


图8-69 操作环境设置

8. 接着定义边界条件。执行 Define→Boundary Conditions…命令，弹出 Boundary Conditions 对话框。这里只需定义 p-out（压力出口边界），单击 Set... 按钮，弹出如图 8-70 所示的对话框，保持 Gauge Pressure[pascal]为 0，单击 OK 按钮。回到 Boundary Conditions 对话框，选择 Phase 为 water，再单击 Set... 按钮，在图 8-71 所示的 Pressure Outlet 对话框中的 Backflow Volume Fraction 中输入 0。

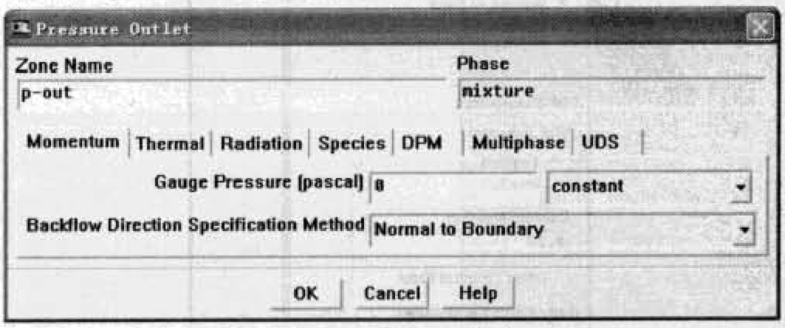


图8-70 压力出口设置

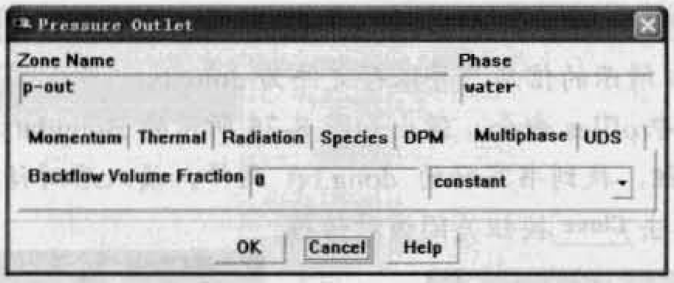


图8-71　压力出口水回流的体积分数设置

上述步骤设置完后，到了本例的关键一步，即动网格模型的定义。

9. 执行 Define→Dynamic Mesh→Parameters 命令，在弹出的 Dynamic Mesh Parameters 对话框中勾选 Dynamic Mesh 选项，对话框自动展开如图 8-72 所示。在 Smoothing 选项卡输入图示参数，然后在 Remeshing 选项卡的 Options 栏中选择 Size Function 和 Must Improve Skewness，其参数设置如图 8-73 所示，单击 OK 按钮。

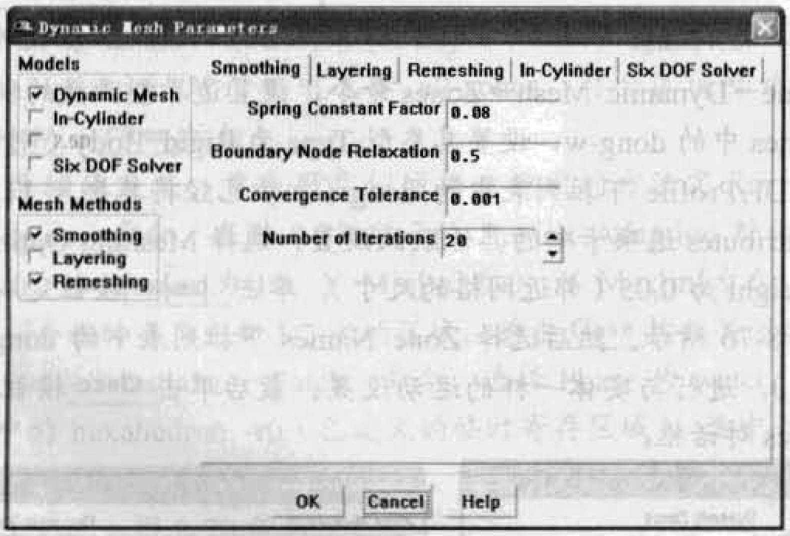


图8-72　启用动网格模型

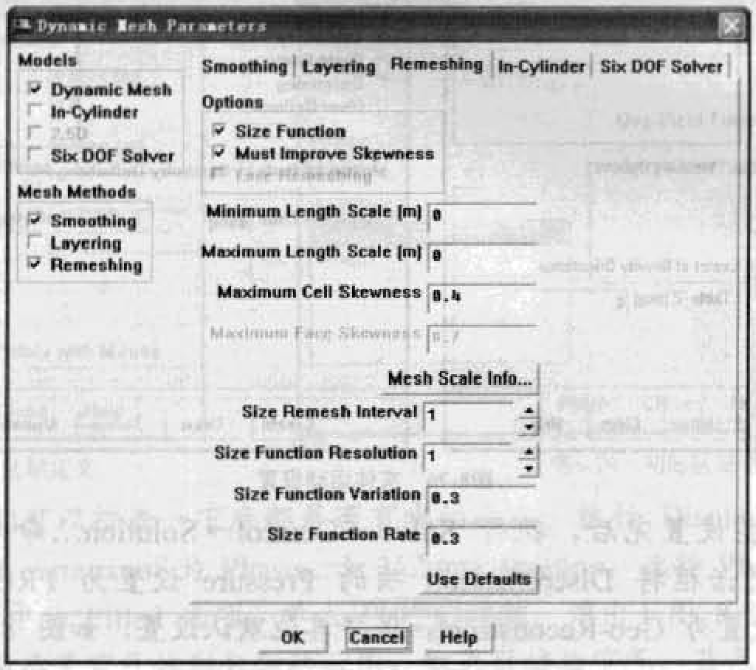


图8-73　局部重构网格参数设置

10. 由于本例运用边界型函数来控制实体的运动，故打开一个空白记事本文件，输入如图 8-74 所示的信息，并保存文件为 dong.txt。

11. 执行 Define→Profiles 命令，弹出如图 8-75 所示的 Boundary Profiles 对话框，单击 Read... 按钮，找到书写好的 dong.txt 文件，读入后对话框会自动显示相关信息，完后单击 Close 按钮关闭该对话框。

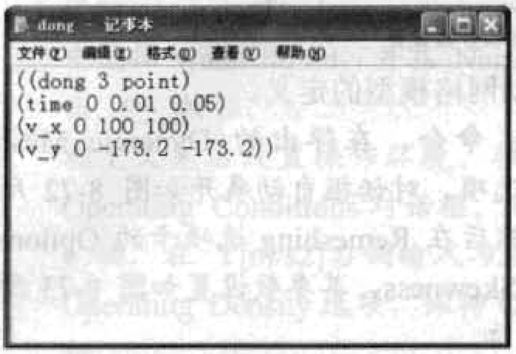


图8-74　边界型函数

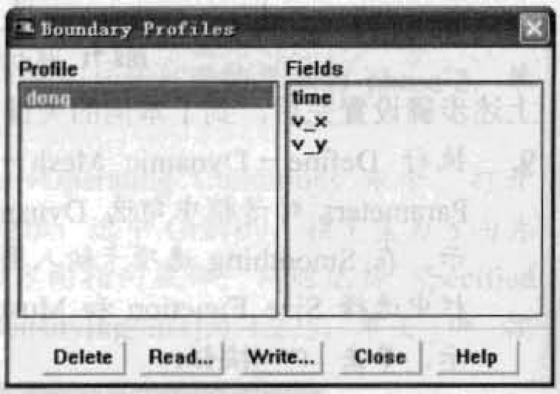


图8-75　读入边界型函数

12. 执行 Define→Dynamic Mesh→Zones 命令，设置边界型函数的使用对象，选择 Zone Names 中的 dong-w，设置其类型 Type 为 Rigid Body（刚体运动），选择 Motion UDF/Profile 下拉列表中的 dong（上步已经将其导入 FLUENT），保持 Motion Attributes 选项卡中的其他默认设置。选择 Meshing Options 选项卡，设置 Cell Height 为 0.05（邻近网格的尺寸），单击 Create 按钮完成实体的运动设置，如图 8-76 所示。然后选择 Zone Names 下拉列表中的 dong（包裹实体的外层区域），进行与实体一样的运动设置。最后单击 Close 按钮关闭 Dynamic Mesh Zones 对话框。

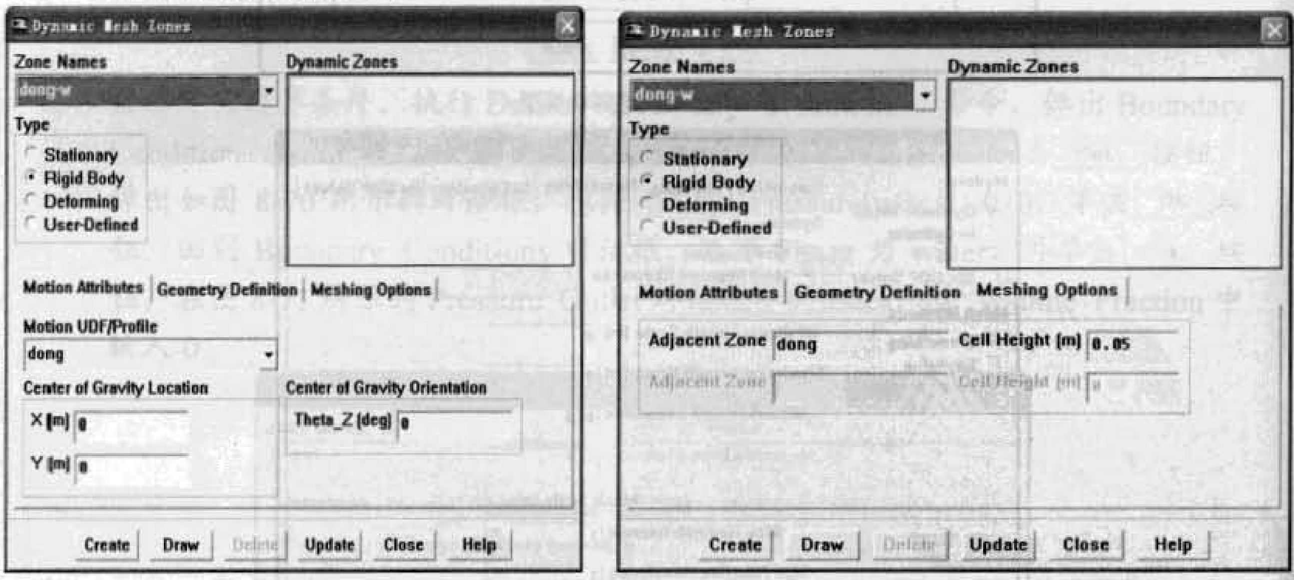


图8-76　实体运动设置

13. 动网格模型设置完后，执行 Solve→Control→Solution...命令，在 Solution Controls 对话框将 Discretization 项的 Pressure 设置为 PRESTO!，Volume Fraction 设置为 Geo-Reconstruct，保持其他默认设置，如图 8-77 所示，单击 OK 按钮。

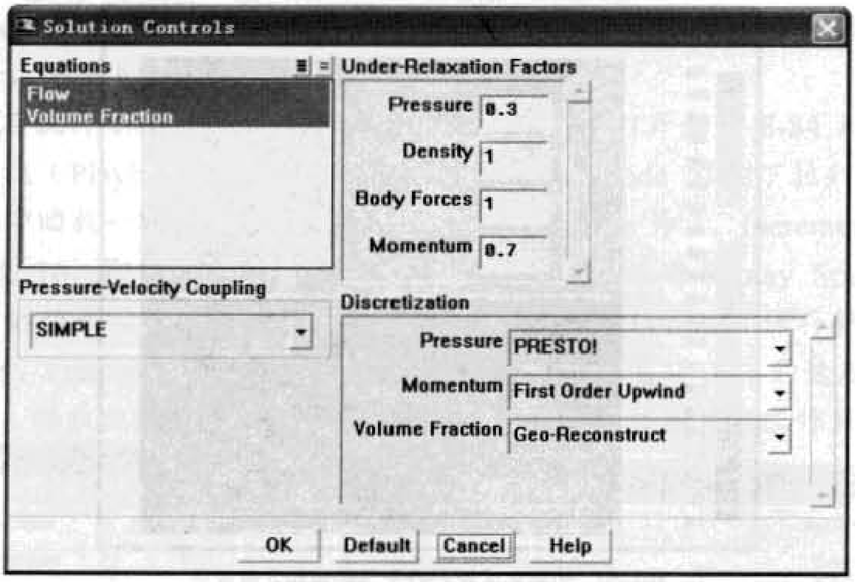


图8-77　求解参数设置

14. 接下来对流场进行初始化，执行 Solve→Initialize→Initialize...命令，在 Solution Initialization 对话框中选择 all-zones，对全区域初始化，顺序单击 Init 、 Apply 、 Close 按钮。
15. 补充初始区域的定义，首先用类似网格自适应的方法定义一个区域。执行 Adapt→Region...命令，在图 8-78 所示的 Region Adaption 对话框中，设置 X Min[m]为 0，X Max[m]为 10，Y Min[m]为 0，Y Max[m]为 5，然后单击 Mark 按钮创建一个临时寄存底部 1/2 水的区域，单击 Close 按钮关闭该对话框。
16. 接着执行 Solve→Initialize→Patch...命令，选择 Phase 为 water，选择 Registers to Patch 中的 hexahedron -r0（已定义的临时寄存区域），选中 Variable 列表中的 Volume Fraction，在 Value 栏输入 1，单击 Patch 按钮完成底部 1/2 区域为水的初始化定义，如图 8-79 所示。

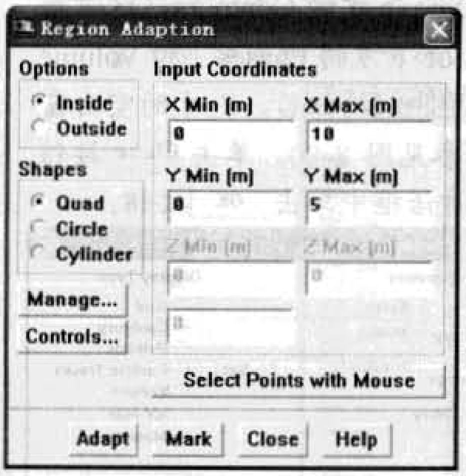


图8-78　临时区域定义

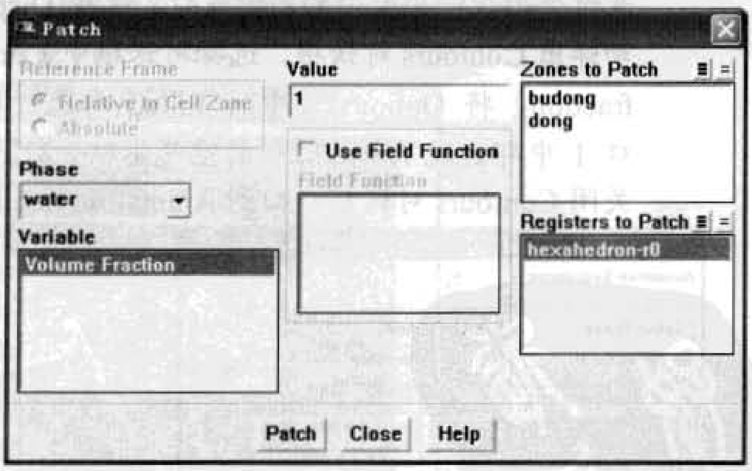


图8-79　初始区域定义

17. 此时，我们可以检查一下底部是否有水的存在。执行 Display→Contours...命令，选择 Contours of 为 Phase...和 Volume fraction，选择 Phase 为 air，勾选 Options 栏中的 Filled 选项，单击 Display 按钮，弹出如图 8-80 所示的视图窗口，图中显示了空气体积分数的云图，红色区域为空气，蓝色区域为水。

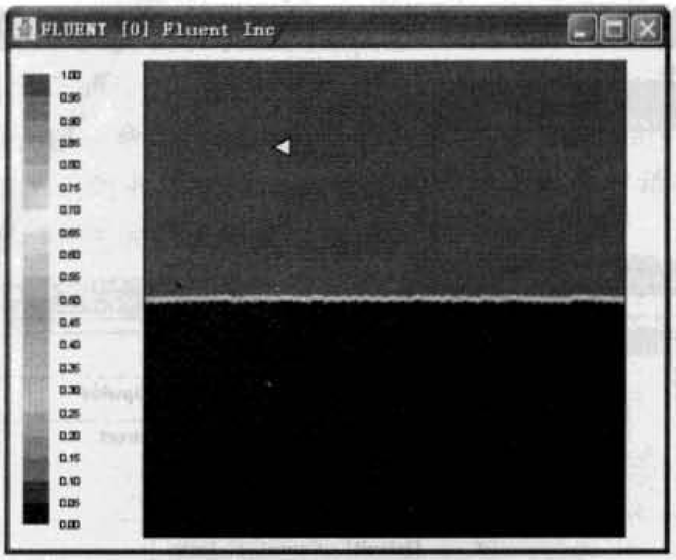


图8-80　初始化区域后的空气的体积分数显示

18. 初始化后，执行 Solve→Monitors→Residual...命令，在弹出的 Residual Monitors 对话框中选中 Plot，以打开残差曲线图。对话框下方的 Criteria 栏中可以输入各参数的收敛精度要求，FLUENT 默认为 0.001，本例保持默认，单击 OK 按钮。

19. 下面设置本例的动画，执行 Solve→Animate→Define 命令，弹出 Solution Animation 对话框，通过右侧的箭头将数字从 0 调成 1。如图 8-81 所示，在 Name 栏输入 phase，将 When 选为 Time Step，设置 Every 为 25，即每一帧的录像时间为 25 个时间步。

20. 接着对动画进行详细设置，单击 phase 行最右侧的 Define... 按钮，弹出如图 8-82 所示的 Animation Sequence 对话框。选择对话框中的 Storage Type 为 Metafile，在 Window 栏输入 1，通过单击右侧 Set 按钮使对应的 id 窗口生效，此时会出现一个空白的图形窗口。选择 Display Type 下方的 Contours，这时自动弹出 Contours 对话框，选择对话框中 Contours of 下方的 Phases...和 Volume fraction，将 Options 栏中的 Filled 勾选，单击 Display 按钮后，刚才的空白窗口 1 中即出现了初始时刻的空气体积分数云图，参见图 8-80。单击 Close 按钮关闭 Contours 对话框，回到 Animation Sequence 对话框中单击 OK 按钮。

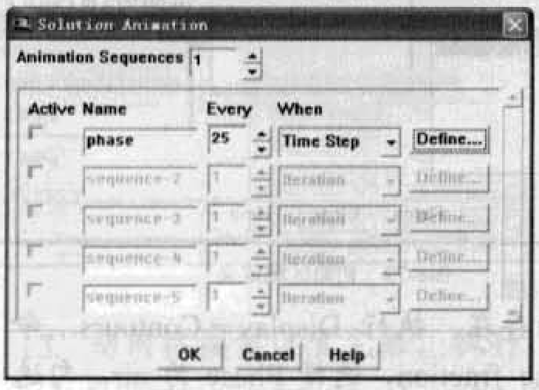


图8-81　动画个数设置

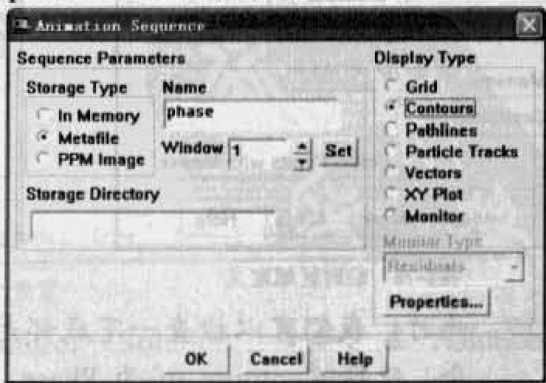


图8-82　Animation Sequence 对话框

21. 完成上述步骤的设置后，执行 File→Write→Case...命令，将工程文件保存为 sl8-2.cas。

22. 执行 Solve→Iterate...命令，设置时间步长为 0.0001s，时间步为 400，如图 8-83 所示，单击 Iterate 按钮开始解算。

23. 迭代完后执行 Solve→Animate→Playback 命令，打开如图 8-84 所示的动画回放对话框（Playback 对话框），选择 Playback Mode 右侧下拉列表中的 Play Once，即回放一次。选中 phase，保持 Start Frame 为 1，Increment 为 1，End Frame 为 16，即从第 1 帧开始回放直至第 16 帧。拖动 Replay Speed 的滚动条可以控制动画回放的速度。最后在 Write/Record Format（保存格式）中选择 Hardcopy Frames，单击 Write 按钮。此时可以看到窗口 1 中的速度动画开始重新播放，播放的同时，动画将以 jpg 的格式保存每帧图片在工作目录下。

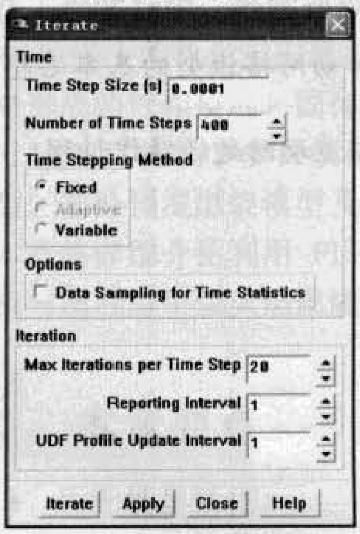


图8-83 迭代设置

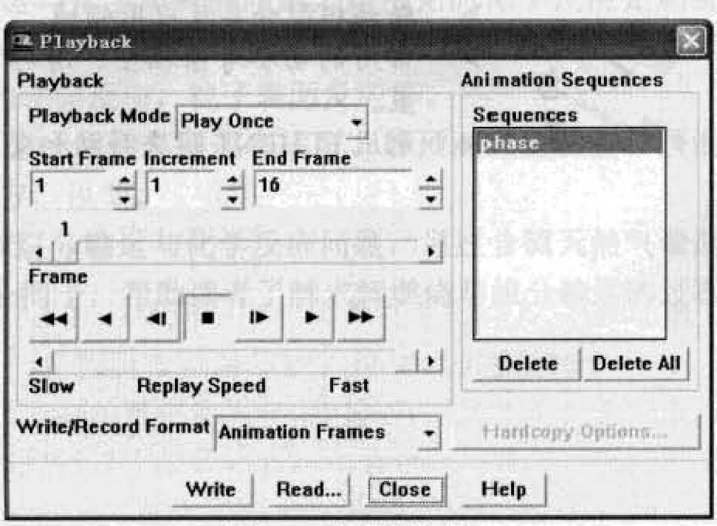


图8-84 动画回放与保存

24. 将生成的空气体积分数的每帧图片保存在新建文件夹下，然后以文件夹的形式导入 Adobe ImageReady 中进行动画处理，生成动画文件 dm.gif，并保存于当前工作目录下。

25. 执行 Display→Contours...命令，此时的空气体积分数云图如图 8-85 所示。从图中可以清晰看出实体入水后溅起的较大水花。

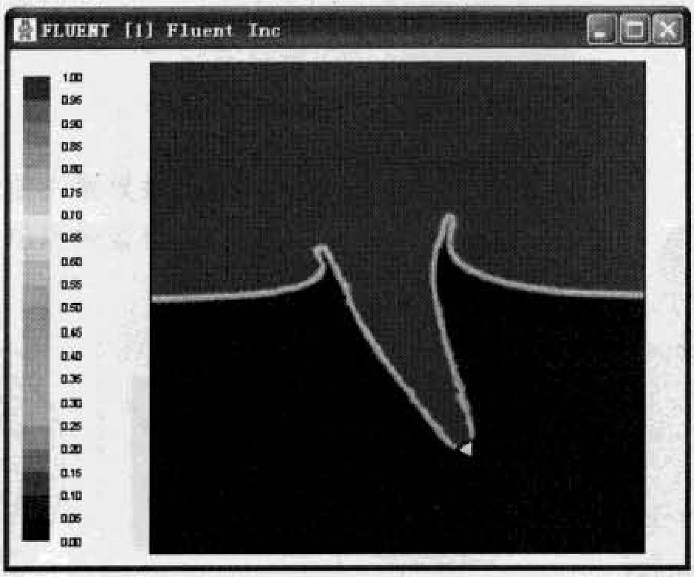


图8-85 0.04s 后的空气体积分数云图

26. 执行 File→Write→Data...命令，将计算结果保存为 sl8-2.dat 文件。最后执行

File→Exit 命令，安全退出 FLUENT。

8.4 本章小结

本章主要讲述了转动模型的概念及其使用方法，详细介绍了动参考系模型、滑移网格模型及动网格模型的基本思想和设置方法，通过两个实例的讲述分别展示了动参考系模型、滑移网格模型与动网格模型的设置过程及求解步骤，另外还阐述了如何采用了边界型函数定义物体的运动，帮助读者熟悉 FLUENT 求解移动和变形区域流体流动问题的过程，学会利用转动模型分析相关实际工程问题。

备忘录

- 转动模型分类及应用领域。
- 常用的动参考系模型、滑移网格模型和动网格模型的基本思想和设置。
- 利用 FLUENT 解决移动和变形区域流体流动问题的操作过程。

第 9 章
组分输运与化学反应模型

在工程实际中，经常遇到有组分输运与化学反应的问题，最常见的化学反应是燃烧。FLUENT 强大的化学反应模拟能力能够模拟各种复杂的燃烧与化学反应过程，如 No_x 和其他污染形成的气相反应，固体壁面发生的表面反应，粒子表面反应等。

FLUENT 提供了多种模拟反应的模型：通用有限速率模型、非预混燃烧模型、预混燃烧模型、部分预混燃烧模型及 PDF 输运方程模型。

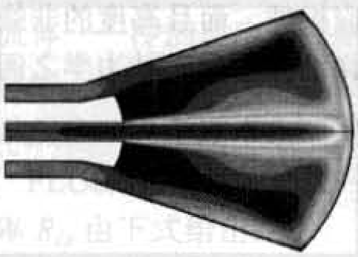
本章将详细介绍利用 FLUENT 求解组分输运与化学反应问题，通过含硫天然气泄漏扩散模拟与圆柱型甲烷火焰燃烧器模拟两个例子，帮助读者了解求解燃烧与组分输运的过程。

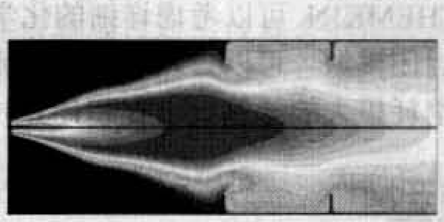
本章要点

- 反应模型概述。
- 通用有限速率模型。
- 层流有限速率模型。
- 涡耗散模型。
- EDC 模型。
- 组分输运计算的设置。
- 燃烧反应的设置。

本章案例

- 含硫天然气泄漏扩散模拟。
- 圆柱型甲烷火焰燃烧器模拟。







9.1 概述

FLUENT 强大的化学反应模拟能力能够模拟各种复杂的燃烧和化学反应过程，多年来帮助工程师们解决了多个工程实际难题。例如：FLUENT 可以模拟 No_x 和其他污染形成的气相反应，帮助环保工作者及时分析污染物的组分与浓度；FLUENT 能够模拟粒子表面反应（如炭颗粒的燃烧），帮助工程师设计最优的节能降耗措施。

在工程实际中，经常遇到有组分输运与化学反应的问题，最常见的化学反应是燃烧。燃烧按照参与反应的流体可以分为单相和多相燃烧，按照反应前后各组分的分布可以分为预混燃烧、扩散燃烧和部分预混燃烧，按照燃烧的状态可以分为稳态燃烧和非稳态燃烧，按照反应时间和扩散时间的关系可以分为快速反应和有限反应。在湍流燃烧中，反应速率和流动是相互耦合的，燃烧速率除了取决于化学动力学外，还取决于流场。FLUENT 针对不同的组分输运与化学反应问题具有相应的解算模型，下面对相关模型进行简单介绍。

9.2 反应模型

FLUENT 提供了多种模拟反应的模型：通用有限速率模型、非预混燃烧模型、预混燃烧模型、部分预混燃烧模型及 PDF 输运方程模型。

通用有限速率模型是基于组分质量分数的输运方程解，利用预先定义的化学反应机制对化学反应进行模拟。反应速率在这种方法中以源项的形式出现在组分输运方程中，计算反应速度有几种方法：层流 Arrhenius 速度表达式计算、从 Magnussen 和 Hjertager 的漩涡耗散模型计算、从 EDC 模型计算。通用有限速率模型应用范围最为广泛，可以模拟化学组分混合、输运和反应的问题，壁面或粒子表面反应问题等。下面我们还将详细介绍。

非预混燃烧模型不是求解每个组分输运方程，而是求解一个或两个守恒标量（混合分数）的输运方程，然后从预测的混合分数分布推导出每一个组分的浓度。此方法主要用于模拟湍流扩散火焰。在守恒标量方法中，通过概率密度函数或者 PDF 来考虑湍流的影响。反应机理是使用 flame sheet 方法或者化学平衡计算来处理反应系统。层流火焰面 flamelet 模型是非预混燃烧模型的扩展，它考虑到了从化学平衡状态形成的空气动力学的应力诱导分离。

预混燃烧模型主要用于单一、完全预先混合好的燃烧系统。在这些问题中，完全的混合反应物和燃烧产物被火焰前缘分开，通过求解反应发展变量来预测火焰前缘的位置。湍流的影响则是通过考虑湍流火焰速度来计算出来的。

部分预混燃烧模型是描述非预混燃烧与完全预混燃烧结合的系统。通过结合混合分数方程和反应物发展变量来分别确定组分浓度和火焰前缘的位置。

PDF 输运方程模型结合 CHEMKIN 可以考虑详细的化学反应机理，而且高度的非线性化学反应项是精确模拟，无须封闭模型，可以合理地模拟湍流和详细化学反应动力学之间的相互作用。缺点是该方法需要消耗极大的计算机内存和计算时间。

9.3 通用有限速率模型

通用有限速率模型是最常用的模型，其计算反应速度有几种方法，下面详细介绍。

一、层流有限速率模型

该模型使用 Arrhenius 公式计算化学源项，忽略了湍流脉动的影响。因此对于层流燃烧或化学反应相对缓慢的湍流燃烧是准确的，而对于高度非线性的湍流火焰一般是不精确的。

化学物质 i 的化学反应净源项通过其参加的 N_r 个化学反应的 Arrhenius 反应源的和计算得到。

$$R_i = M_{w,i} \sum_{i=1}^{N_r} R_{i,r} \tag{9-1}$$

式中，$M_{w,i}$ 为第 i 种物质的分子量，$R_{i,r}$ 为第 i 种物质在第 r 个反应中的产生/分解速率。

第 r 个反应可以表示成如下形式：

$$\sum_{i=1}^{N} v'_{i,r} M_i \xleftrightarrow[k_{b,r}]{k_{f,r}} \sum_{i=1}^{N} v''_{i,r} M_i \tag{9-2}$$

式中，N 为系统化学物质数目，$v'_{i,r}$ 为反应 r 中反应物 i 的化学计量系数，$v''_{i,r}$ 为反应 r 中生成物 i 的化学计量系数，M_i 为第 i 种物质的符号，$k_{f,r}$ 为反应 r 正向速率常数，$k_{b,r}$ 为反应 r 逆向速率常数。

反应 r 中物质 i 的产生/分解摩尔速度为：

$$\hat{R}_{i,r} = \Gamma\left(v''_{i,r} - v'_{i,r}\right)\left(k_{f,r}\prod_{j=1}^{N_r}\left[C_{j,r}\right]^{\eta'_{j,r}} - k_{b,r}\prod_{j=1}^{N_r}\left[C_{j,r}\right]^{\eta''_{j,r}}\right) \tag{9-3}$$

式中，N_r 为反应 r 的化学物质数目，$C_{j,r}$ 为反应 r 中每种反应物或生产物 j 的摩尔浓度，$\eta'_{j,r}$ 为反应 r 中每种反应物或生产物 j 的正向反应速度指数，$\eta''_{j,r}$ 为反应 r 中每种反应物或生产物 j 的逆向反应速度指数，Γ 为第三体对反应速度的净影响，缺省状态为不包括。

反应 r 的正向速率常数 $k_{f,r}$ 通过如下 Arrhenius 公式计算：

$$k_{f,r} = A_r T^{\beta_r} e^{-E_r/RT} \tag{9-4}$$

式中，A_r 为指数因子，β_r 为温度指数，E_r 为反应活化能（J/（kg·mol）），R 为气体常数（J/（kg·mol·K））。

在一般工程计算中，通常不考虑逆向反应，但是 FLUENT 中提供了设置逆向反应参数的选项，可以通过化学平衡常数的设置来计算逆向反应常数。

二、涡耗散模型

大部分燃料都能快速燃烧，整体反应速率由湍流混合控制。在非预混火焰中，湍流缓慢地通过对流/混合燃料和氧化剂进入反应区，在反应区内快速地燃烧。而在预混火焰中，湍流流体——冷的反应物和热的生成物通过对流或混合的形式进入反应区，在反应区迅速地发生反应。在这些情况下，燃烧称为混合限制的，即扩散控制的燃烧，可以忽略复杂而未知的化学反应动力学速率。

FLUENT 提供的湍流—化学反应相互作用模型称为涡耗散模型。反应 r 中物质 i 的产生速率 $R_{i,r}$ 由下式给出：

$$R_{i,r}=\min\left\{v'_{i,r}M_{w,i}A\rho\frac{\varepsilon}{k}\min_{R}\left(\frac{Y_R}{v'_{R,r}M_{w,R}}\right),v'_{i,r}M_{w,i}AB\rho\frac{\varepsilon}{k}\frac{\sum_{P}Y_P}{\sum_{j}^{N}v''_{j,r}M_{w,j}}\right\} \tag{9-5}$$

式中，Y_P是任何一种产物的质量组分；Y_R是某种产物的质量组分；A、B 为经验常数，分别取 4.0 和 0.5。

在式（9-5）中，化学反应速率由大尺度涡混合时间尺度 k/ε 控制。只要湍流出现（$k/\varepsilon>0$），燃烧即可进行，不需要点燃火源来启动燃烧。这通常对于非预混火焰是可以接受的，因为此时往往是扩散控制化学反应速率。但在预混火焰中，如果仅仅使用涡耗散模型就不是很合理了，因为此时化学动力学因素也在控制着反应。为了修正这一点，FLUENT 提供了有限速率/涡耗散模型，其中式（9-1）的 Arrhenius 反应速率和式（9-5）的涡耗散反应速率都进行计算。净反应速率取两个速率中较小的。实际上，Arrhenius 反应速率作为一种动力学开关，用于阻止反应在火焰稳定之前发生。一旦火焰被点燃，涡耗散速率通常会小于 Arrhenius 反应速率，并且反应是混合限制（扩散控制燃烧）的。

尽管 FLUENT 允许采用涡耗散模型和有限速率/涡耗散模型的多步反应机理（反应数>2），但可能会产生不正确的结果。原因是多步反应机理基于 Arrhenius 速率，每个反应的具体参数都不一样。在涡耗散模型中，每个反应都有同样的湍流速率，因而模型只能用于单步（反应物—产物）或是双步（反应物—中间产物，中间产物—产物）总包反应。模型不能预测化学动力学控制的物质，如自由基。如果希望考虑湍流流动中的多步化学动力学机理，可以使用 EDC 模型。

涡耗散模型需要产物来启动反应。当初始化求解的时候，FLUENT 设置产物的质量百分数为 0.01，通常足够启动反应。在湍流模型选用大涡模拟时，涡耗散模型中的时间尺度将被亚格子混合速率时间尺度所代替。

三、EDC 模型

EDC（涡-耗散-概念）模型是涡耗散模型的扩展，在湍流流动结构中包含详细的化学反应机理。该模型假设化学反应都发生在小涡中，称为精细涡，而反应的时间是由精细涡及化学反应本身需要的时间来共同控制的。

小涡的空间分辨率为：

$$\xi^*=C_\xi\left(\frac{\upsilon\varepsilon}{k^2}\right)^{3/4} \tag{9-6}$$

式中，C_ξ为容积比率常数，取 2.1377。

化学组分在 t^*时间内发生化学反应，t^*表达式为：

$$t^*=C_t\left(\frac{\upsilon}{\varepsilon}\right)^{1/2} \tag{9-7}$$

式中，C_t为时间尺度常数，取 0.4082。

组分守恒方程中的化学反应源项为：

$$R_i=\frac{\rho\left(\xi^*\right)^2}{\tau^*\left[1-\left(\xi^*\right)^3\right]}\left(Y_i^*-Y_i\right) \tag{9-8}$$

式中，Y^*为精细涡的时间尺度；τ^*为化学反应之后的组分质量分数；Y 为同样的物质在反应前的浓度。

EDC 模型能够在湍流反应流动中考虑详细的化学反应机理，但消耗的内存较多，时间长，所以通常在快速化学反应假定无效的情况下才使用该模型，如快速熄灭火焰中缓慢的 CO 烧尽、选择性非催化还原中的 NO 转化等问题。

【实例 9-1】：含硫天然气泄漏扩散模拟

天然气是一种清洁、方便的能源，管道运输是天然气最主要的运输方式，已经成为国民经济不可替代的“生命线”。然而，由于管道的腐蚀老化、管材缺陷、第三方破坏、误操作、施工缺陷等原因，管道常常发生泄漏、破裂、燃烧爆炸等事故，严重威胁管道周围环境和人员安全，并可能造成巨大的经济损失。随着输气管道向大口径、高压的方向发展，管道泄漏和爆裂的危险性随之增加，对天然气泄漏扩散规律的深入研究已刻不容缓。本例将利用 FLUENT 对平坦地区含硫天然气集输管道的泄漏扩散进行模拟，下面进行详细介绍。

一、实例概述

参照某集输管道工程，选取管道直径为 610mm，考察长度为两截断阀间距离 5km，考察段管道的起点压力为 3.5MPa，终点压力为 3.35MPa，天然气年均输量取 $20\times10^8\text{m}^3$，硫化氢含量较高，取为 20mg/L，设计年工作天数按 350d 计算，外界环境温度最高气温 38℃，最低温度-10℃，平均气温 16℃，天然气的年平均气温为 26℃。

取一个足够大且包含泄漏区域以及扩散区域在内的空间（高 100m、泄漏半径为 50m），研究天然气在此空间内的扩散情况。泄漏口采用二维孔口模型，口径为 10cm。左侧水平向右的风速为 5m/s，模型简图如图 9-1 所示。

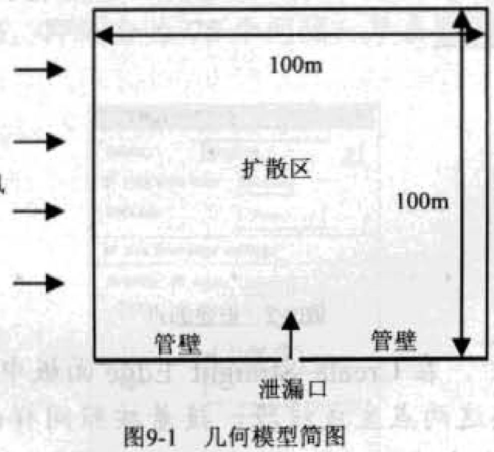


图9-1 几何模型简图

思路分析

高速气流经由泄漏口喷射出，在泄漏口上方一定高度内的速度梯度较大，因此有必要将计算区域划分成几块，且泄漏口上方的区域需要网格细划。由于本例涉及到泄漏扩散问题，所以应该采用组分输运模型（Species Transport），而不启动化学反应模型。

通过本实例的演示过程，读者将学习到：

- 区域分块；
- 网格细划；
- 组分定义；
- 组分输运模型设置；
- 多入口边界定义；
- 多出口边界定义；
- 组分云图显示；
- 安全区域显示。

结果文件——参见附带光盘“Ch9\sl9-1.msh”、“Ch9\sl9-1.dbs”、“Ch9\sl9-1.jou”、“Ch9\sl9-1.trn”、“Ch9\sl9-1.cas”、“Ch9\sl9-1.dat”。

动画演示——参见附带光盘“Ch9\AVI\sl9-1.avi”。

二、模型建立

1. 启动 GAMBIT，首先建立模型的控制点。单击 → → ，在 Create Real Vertex 面板的 x、y、z 坐标输入栏中输入（0，0，0），单击 Apply 按钮生成第一个点，按同样方法建立点（49.95，0，0）、点（50.05，0，0）、点（100，0，0）、点（0，100，0）和点（100，100，0）。由于需要将计算区域分块，故再建立 4 个点，坐标分别为（45，30，0）、（55，30，0）、（40，100，0）和（60，100，0）。至此，共创建了 10 个控制点，如图 9-2 所示。

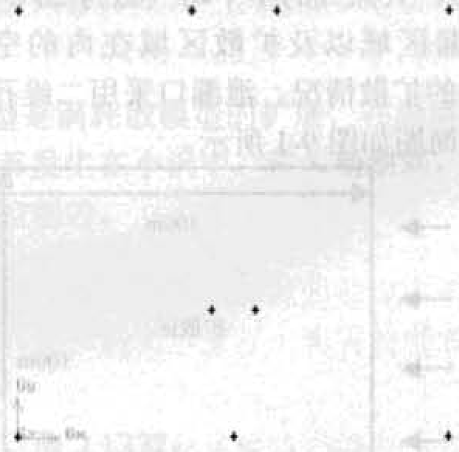


图9-2 创建的点

2. 单击 → → ，在 Create Straight Edge 面板中选择点 1（Vertix.1）与点 2（Vertix.2），连接这两点生成线段，接着按照同样的方法连接其余线段，分别为点 2（Vertix.2）与点 3（Vertix.3）、点 3（Vertix.3）与点 4（Vertix.4）、点 1（Vertix.1）与点 5（Vertix.5）、点 4（Vertix.4）与点 6（Vertix.6）、点 5（Vertix.5）与点 9（Vertix.9）、点 9（Vertix.9）与点 10（Vertix.10）、点 6（Vertix.6）与点 10（Vertix.10）、点 7（Vertix.7）与点 9（Vertix.9）、点 8（Vertix.8）与点 10（Vertix.10）、点 2（Vertix.2）与点 7（Vertix.7）和点 3

（Vertix.3）与点 8（Vertix.8）之间的线段，共 12 条线段，如图 9-3 所示。

从图中可以看出，我们大体将计算区域分成了三块，泄漏口上方的中间部分较狭小，两侧区域稍大一些。

3. 下面我们将生成的线段围成所需要的 3 个面域，单击 → → ，在 Create Face from Wireframe 面板中利用 Shift+鼠标左键框选中间区域的 6 条边，然后单击 Apply 按钮创建该面，两侧区域的面生成方法与其相同，均为框选各自的 5 条边后单击 Apply 按钮生成，最后生成的 3 个面如图 9-4 所示。

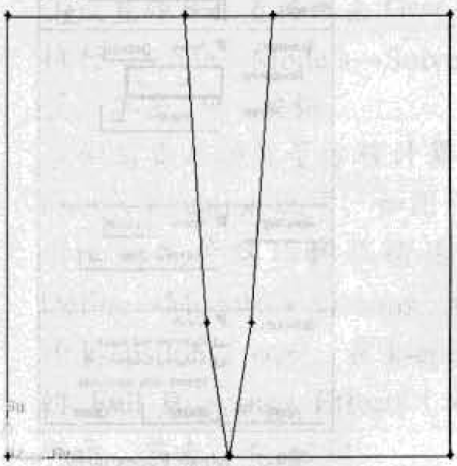


图9-3 创建的线段

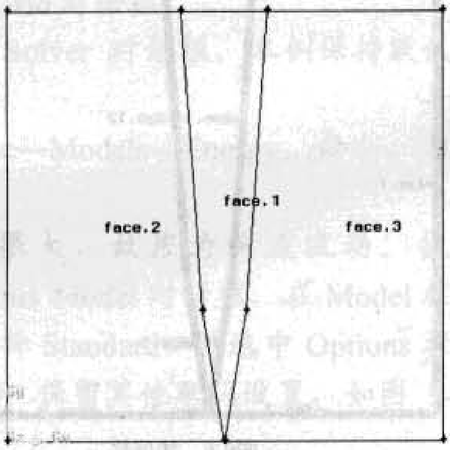


图9-4 生成的 3 个面

三、网格划分

本例的计算区域划分成了 3 块，中间区域需要较密的网格。我们遵循由线到面的网格划分步骤。

1. 单击 → → ，弹出如图 9-5 所示的 Mesh Edges 面板。在 Edges 中选取线段 1（edge.1）、线段 3（edge.3）、线段 8（edge.8）、线段 10（edge.10）、线段 11（edge.11）和线段 12（edge.12）6 条边，运用 Interval counte 划分方法，并在左侧输入 75，即划分为 75 个间隔，单击 Apply 按钮，生成这 6 条线的线网格。

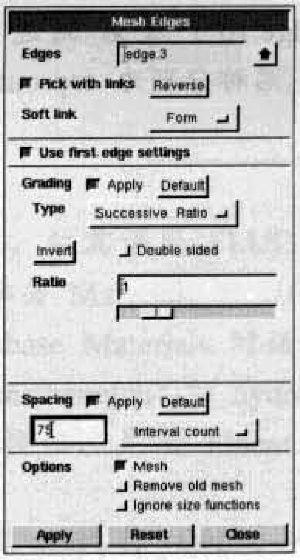


图9-5 Mesh Edges 面板

2. 按照同样的线网格划分方法，将线段 6（edge.6）和线段 7（edge.7）划分为 125 个间隔，将线段 4（edge.4）和线段 5（edge.5）划分为 50 个间隔，将线段 9（edge.9）划分为 60 个间隔，将漏口线段 2（edge.2）划分为 20 个间隔，最后生成如图 9-6 所示的线网格。

3. 线网格划分完后，单击 → → ，打开如图 9-7 所示的 Mesh Faces 面板，选取中间区域的面（面 1），运用 Tri 单元与 Pave 方法对该面进行面网格划分，保留其他默认设置，单击 Apply 按钮即可。

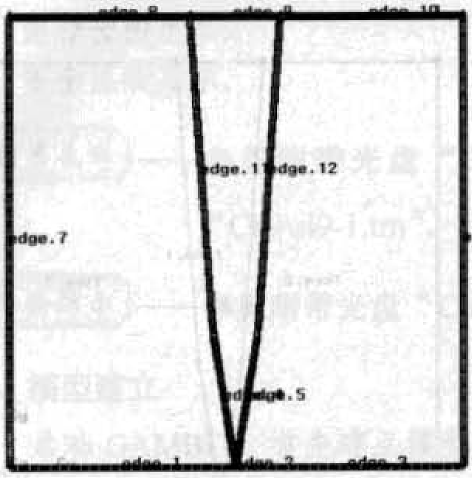


图9-6 线网格

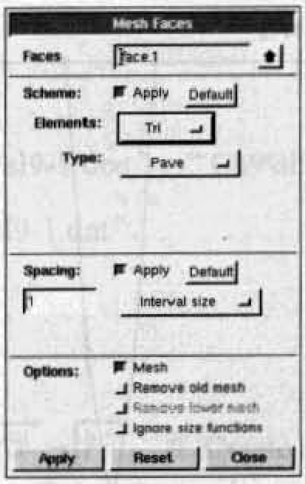


图9-7 Mesh Faces 面板

4. 同样，选取左右两侧的面（面 2 与面 3），运用 Quad 单元与 Map 方法对这两个面进行面网格划分，保留其他默认设置，单击 Apply 按钮。

最后生成的面网格如图 9-8 所示，中间区域的网格较密，且泄漏口上方一定高度内的网格最密，这样可以满足中间区域计算精度的要求；两侧区域的网格稍疏，且采用的是四边形网格，这样可以有效节约计算资源。

至此完成了 3 个面的网格划分，下面定义边界类型。

5. 单击 → ，在 Specify Boundary Types 面板中将泄漏口（edge.2）定义为速度进口（VELOCITY_INLET），名称为 in，将左侧边（edge.7）也定义为速度进口（VELOCITY_INLET），名称为 wind-in，将计算区域最上边的 3 条线段（edge.8、edge.9、edge.10）及右侧边（edge.6）定义为压力出口（PRESSURE_OUTLET），名称分别为 top-out1、top-out2、top-out3 和 right-out，如图 9-9 所示。

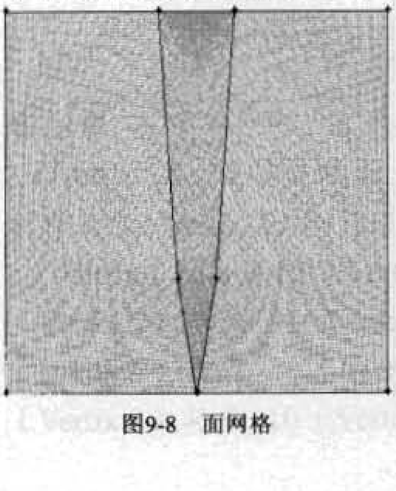


图9-8 面网格

Name	Type
in	VELOCITY_INLI
wind-in	VELOCITY_INLI
top-out1	PRESSURE_OU'
top-out2	PRESSURE_OU'
top-out3	PRESSURE_OU'

图9-9 边界类型定义

6. 最后执行 File→Export→Mesh 命令，将网格输出为 sl9-1.msh。

四、求解计算

1. 启动 FLUENT 二维单精度计算器，执行 File→Read→Case...命令，读入划分好的网格文件“sl9-1.msh”。
2. 执行 Grid→Check 命令，对网格进行检测，成功检测后窗口界面中最后一行出现“Done”语句。执行 Grid→Scale...命令，在 Scale Grid 对话框中设置计算区域的尺寸和单位制。由于本例模型在 GAMBIT 中是按 m 生成的，故保持默认设置即可，直接单击 Close 按钮关闭 Scale Grid 对话框。
3. 执行 Define→Models→Solver...命令，弹出 Solver 对话框，本例保持默认设置，单击 OK 按钮。
4. 本例需要启动能量方程计算，故执行 Define→Models→Energy...命令，勾选 Energy Equation 选项，如图 9-10 所示。
5. 由于输气管路均高压输送，泄漏口速度很大，故应为湍流流动。执行 Define→Models→ Viscous...命令，弹出 Viscous Model 对话框，在 Model 栏选择 k-epsilon[2 eqn]，在 k-epsilon Model 栏选择 Standard，并选中 Options 栏中的 Full Buoyancy Effects（考虑全浮力影响），保留其他默认设置，如图 9-11 所示，单击 OK 按钮。

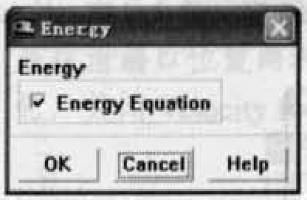


图9-10 启用能量方程

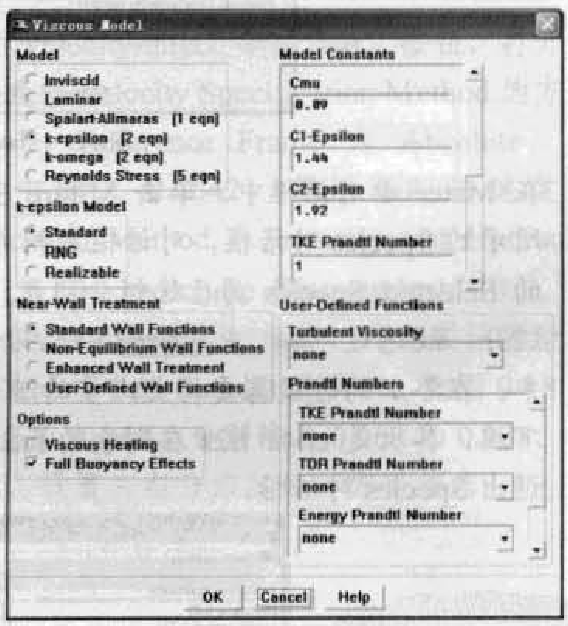


图9-11 湍流模型设置

6. 本例涉及到甲烷和硫化氢，故需调用 FLUENT 自带的材料数据库。执行 Define→Materials 命令，单击 Materials 对话框右侧的 Fluent Database... 按钮，在弹出的 Fluent Database Materials 对话框中，利用滚动条选择 Fluent Fluid Materials 列表中的 methane[ch4]和 hydrogen-sulfide[h2s]，单击 Copy 按钮。最后单击两次 Close 按钮，关闭 Fluent Database Materials 对话框与 Materials 对话框。
7. 下面启动组分输运模型，执行 Define→Models→Species→Transport & Reaction...命令，弹出如图 9-12 所示的 Species Model 对话框，选择 Model 栏

中的 Species Transport，选取 Mixture Material 为 methane-air，单击右侧的 Edit... 按钮，弹出如图 9-13 所示的 Material 对话框。

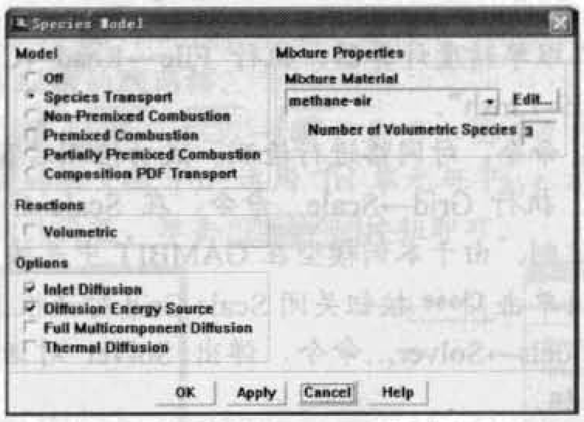


图9-12 Species Model 对话框

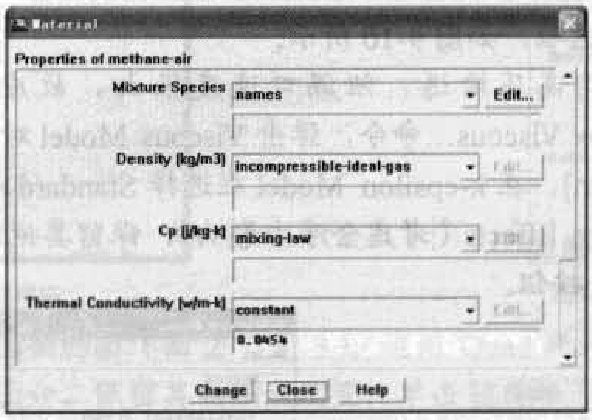


图9-13 Material 对话框

8. 在 Material 对话框中，单击 Miture Species 右侧的 Edit... 按钮，弹出如图 9-14 所示的 Species 对话框，对话框左侧 Available Materials 为可用组分列表，右侧的 Selected Species 为已选组分列表。本例主要考虑甲烷、硫化氢和空气 3 个组分，故通过 Add 或 Remove 按钮添加 h2s、ch4、air 到 Selected Species 列表中。在添加的时候需要将大比重的组分（air）放在 Selected Species 列表的最下端，其次是 ch4、h2s 在列表的最上端。待组分定义好后，单击 OK 按钮，退出 Species 对话框。

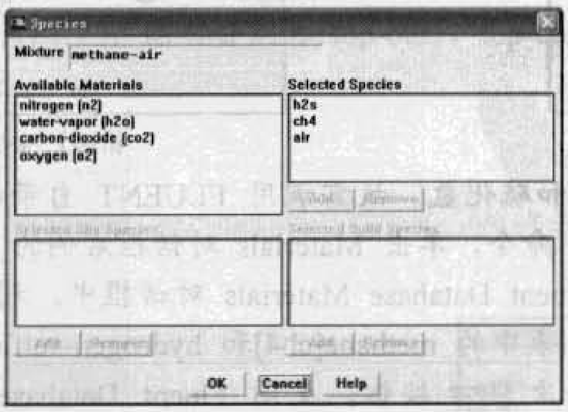


图9-14 Species 对话框

9. 回到 Material 对话框中，单击 Change 按钮保存组分更改设置，单击 Close 按钮关闭 Material 对话框。最后回到 Species Model 对话框，选中 Options 栏中的 Inlet

Diffusion 和 Diffusion Energy Source，单击 OK 按钮，完成组分输运模型的定义。

10. 下一步设置计算的环境。执行 Define→Operating Conditions 命令，打开 Operating Conditions 对话框。如图 9-15 所示，选中 Gravity，设置 Gravitational Acceleration 栏的 Y[m/s2]为-9.8，在 Boussinesq Parameters 栏的 Operating Temperature[k]中输入 288.16，其余保持默认设置，单击 OK 按钮。
11. 执行 Define→Boundary Conditions…命令，在图 9-16 所示的 Boundary Conditions 对话框中定义如下边界条件。

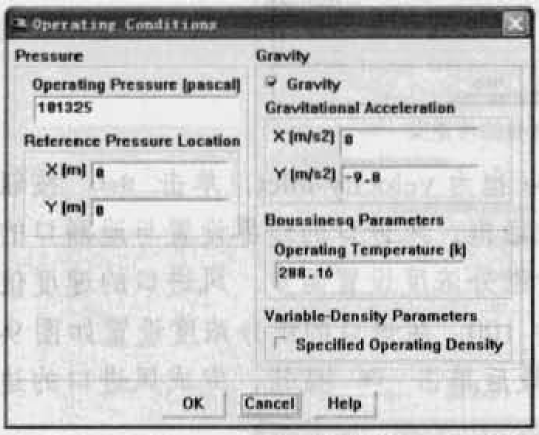


图9-15 操作环境设置

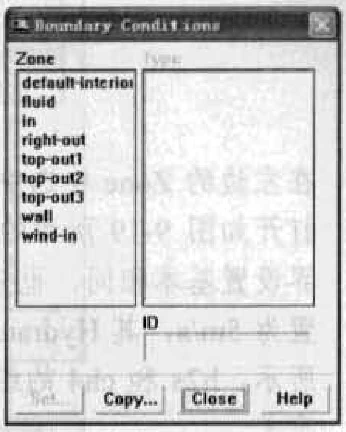


图9-16 边界条件定义对话框

- 在左边的 Zone 栏选中 in，其 Type 为 velocity-inlet，单击 Set... 按钮，打开如图 9-17 所示的 Velocity Inlet 对话框。选择 Velocity Specification Method 的方式为“Magnitude, Normal to Boundary”，Reference Frame 为 Absolute。在 Velocity Magnitude[m/s]右侧输入框中输入 213.42，即泄漏口的速度为 213.42m/s。选择 Turbulence 的 Specification Method 为 Intensity and Hydraulic Diameter，设置 Turbulent Intensity[%]为 10，Hydraulic Diameter[m]为 0.1。泄漏口速度值及湍流参数设置完后还不能直接单击 OK 按钮，还需要设置泄漏口各组分的浓度。选择 Velocity Inlet 对话框中的 Species 选项卡，如图 9-18 所示，在 Species Mass Fractions 下方有 h2s 和 ch4，分别输入 0.065 和 0.935，代表在泄漏口位置两者的浓度分布情况。设置完组分浓度后，方可单击 OK 按钮，关闭 Velocity Inlet 对话框。

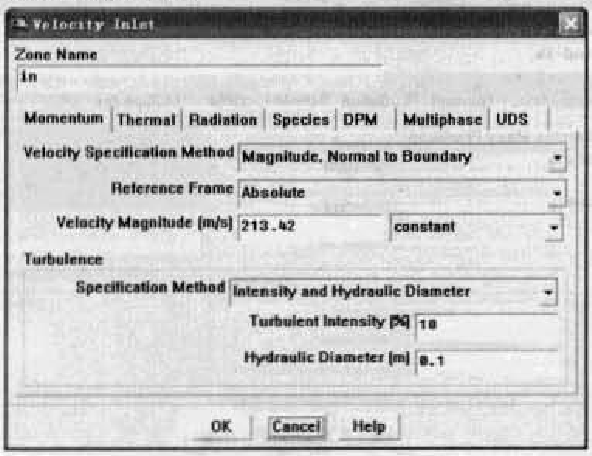


图9-17 泄漏口速度定义

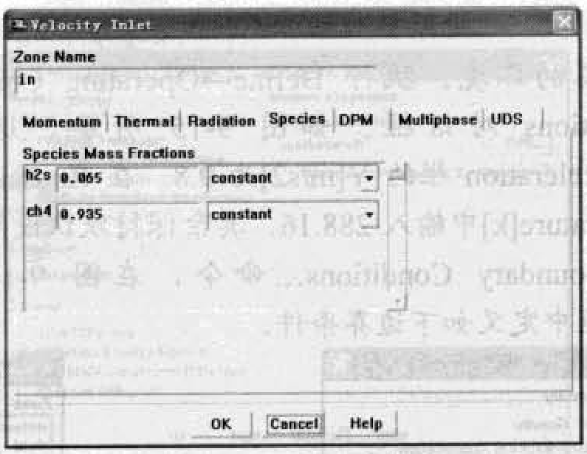


图9-18　泄漏口组分浓度定义

- 在左边的 Zone 栏选中 wind-in，其 Type 也为 velocity-inlet，单击 Set... 按钮，打开如图 9-19 所示的 Velocity Inlet 对话框。风进口的边界设置与泄漏口的边界设置基本相同，也分为速度值设置与组分浓度设置两步。风进口的速度值设置为 5m/s，其 Hydraulic Diameter[m]为 100。风进口的组分浓度设置如图 9-20 所示，h2s 和 ch4 的组分浓度均为 0。最后单击 OK 按钮，完成风进口的边界定义。

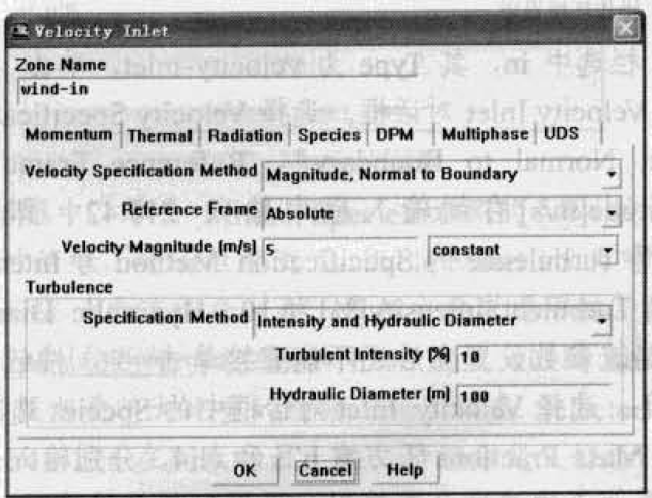


图9-19　风进口速度定义

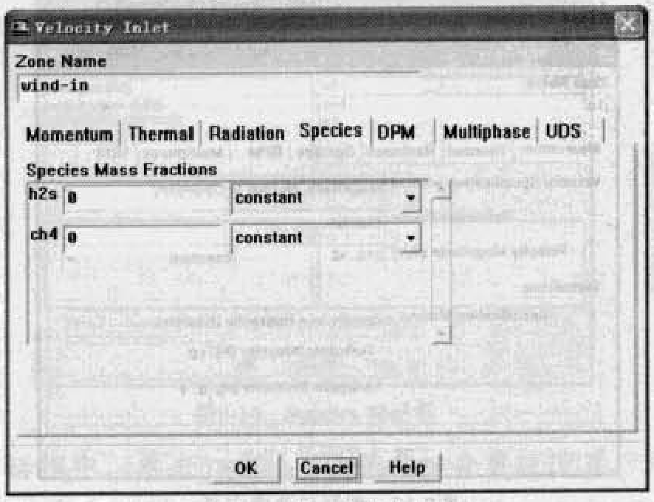


图9-20　风进口组分浓度定义

- 在左边的 Zone 栏选中 top-out1，其 Type 为 pressure-outlet，单击 Set... 按钮，打开如图 9-21 所示的 Pressure Outlet 对话框。保持 Gauge Pressure[pascal]为 0，即环境气压为 1 个大气压。在 Turbulence 栏的 Specification Method 下拉列表中选择 Intensity and Hydraulic Diameter，设置 Turbulent Intensity[%]为 10，Hydraulic Diameter[m]为 40。然后选择对话框中的 Species 选项卡，如图 9-22 所示，在 Species Mass Fractions 栏的 h2s 和 ch4 中均输入 0 和 0。单击 OK 按钮，关闭压强出口边界定义对话框。

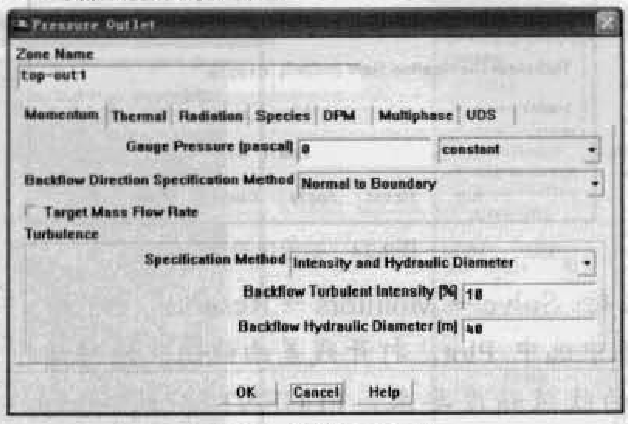


图9-21 压强出口定义

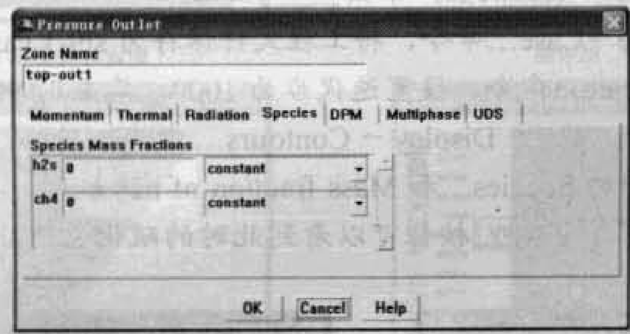


图9-22 压强出口组分浓度定义

- 剩下的 top-out2、top-out3 和 right-out 与 top-out1 的定义相同，均为压强出口边界。不同的是各自的 Hydraulic Diameter[m]不一样，top-out2、top-out3 和 right-out 的 Hydraulic Diameter[m]分别为 20m、40m 和 100m。

12. 边界定义完后，对求解参数进行设置。执行 Solve→Control→Solution...命令，弹出如图 9-23 所示的 Solution Controls 对话框，保持默认设置，单击 OK 按钮。

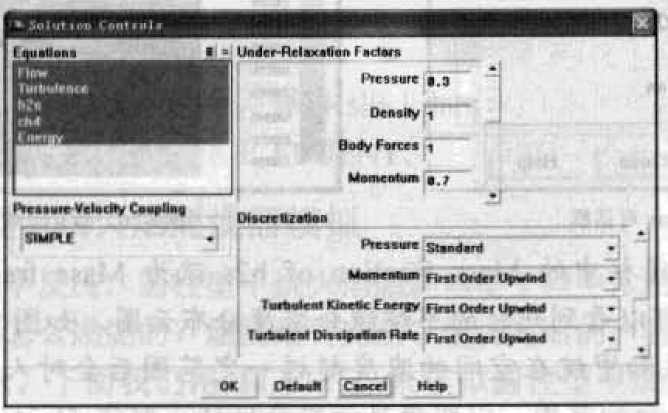


图9-23 求解参数设置

13. 接下来对流场进行初始化。执行 Solve→Initialize→Initialize...命令，在 Solution Initialization 对话框中选择 in，如图 9-24 所示，顺序单击 Init 、Apply 、Close 按钮。

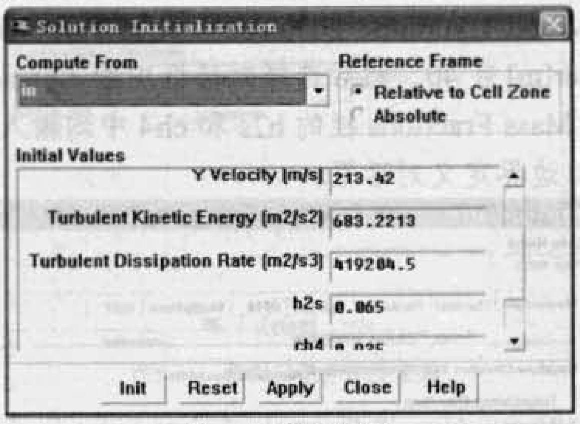


图9-24 初始化设置

14. 初始化后，执行 Solve→Monitors→Residual...命令，在弹出的 Residual Monitors 对话框中选中 Plot，打开残差曲线图。该对话框下方的 Criteria 栏可以输入各参数的收敛精度要求，FLUENT 默认 energy 为 1e-6，其余的为 0.001，本例保持其默认设置，单击 OK 按钮。

15. 执行 File→Write→Case...命令，将工程文件保存为 sl9-1.cas。

16. 执行 Solve→Iterate...命令，设置迭代步为 1000，单击 Iterate 按钮开始解算。

17. 待问题收敛后，执行 Display→Contours...命令，如图 9-25 所示，选择 Contours of 栏中的 Species...和 Mass fraction of h2s 选项，勾选 Options 栏中的 Filled 选项，单击 Display 按钮可以看到此时的硫化氢组分浓度分布云图，如图 9-26 所示。



图9-25 Contours 对话框

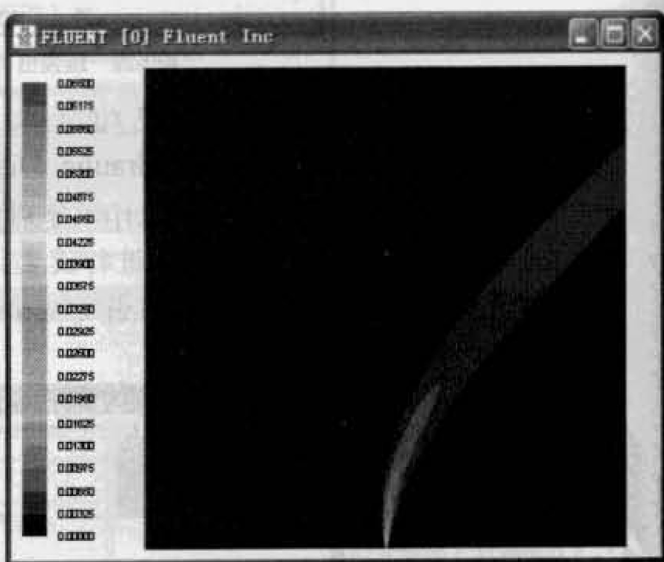


图9-26 硫化氢组分浓度分布云图

18. 将 Contours of 栏中的 Mass fraction of h2s 改为 Mass fraction of ch4，单击 Display 按钮可以看到此时的甲烷组分浓度分布云图，如图 9-27 所示。

19. 考虑到硫化氢和甲烷在空间的浓度超过一定范围后会对人类造成生命威胁，故改变云图显示的范围，以明确显示安全区域。取消 Contours 对话框 Options

栏 Auto Range 选项的勾选，勾选 Clip to Range 选项，在右侧的 Min 和 Max 文本框输入要显示的上下限。首先显示硫化氢的安全区域，如图 9-28 所示，在 Min 文本框中输入 0，Max 文本框中输入 0.00002，单击 Display 按钮，此时的组分浓度云图如图 9-29 所示，其范围为 0 ~ 0.00002，超过 0.00002 的区域被挖去。

20. 同样，对于甲烷而言，设置 Min 为 0，Max 为 0.03585，单击 Display 按钮，其安全区域如图 9-30 所示。

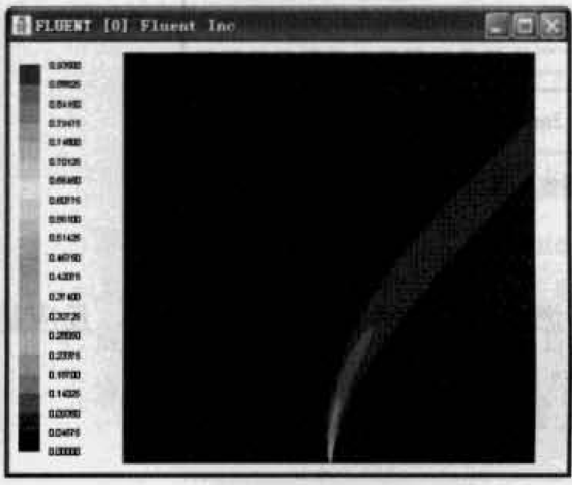


图9-27　甲烷组分浓度分布云图



图9-28　改变云图显示范围

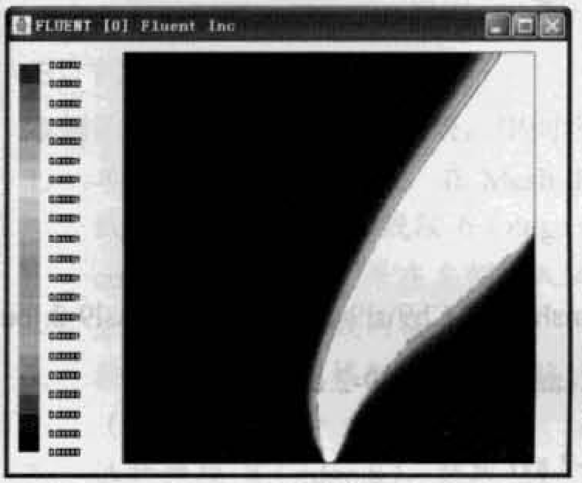


图9-29　硫化氢安全区域

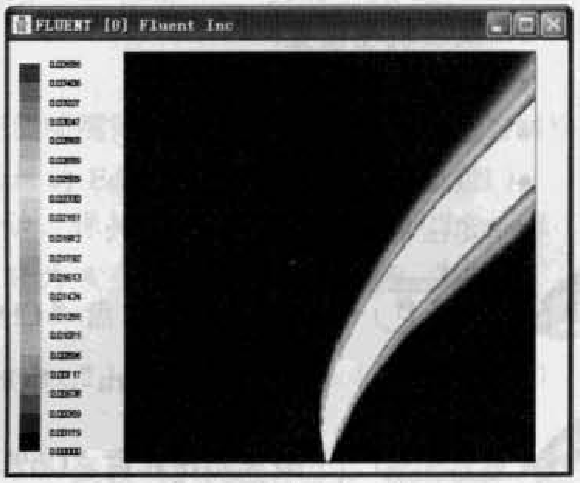


图9-30　甲烷安全区域

注意：这里显示的是安全区域，若要显示危险区域，只需将这里的上限值（Max）设置成下限值（Min），而将上限值设置为 1。

21. 执行 File→Write→Data...命令，保存 sl9-1.dat。

22. 执行 File→Exit 命令，安全退出 FLUENT。

【实例 9-2】：圆柱型甲烷火焰燃烧器模拟

燃烧是最常见的化学反应，圆柱型甲烷火焰燃烧器是工程中常用的燃烧器之一。那么，甲烷进入燃烧器之后是怎么燃烧的？燃烧是否完全？燃烧完后的产物浓度是多少？这些都是工程实际中面临的问题。下面我们用 FLUENT 来模拟圆柱型甲烷火焰燃烧器内的燃烧情况。

一、实例概述

图 9-31 所示为圆柱型甲烷火焰燃烧器，空气以 0.5m/s 的速度进入燃烧器，而甲烷以 80m/s 的速度从中间喷口进入，过量空气系数为 1.28。高速甲烷在燃烧器内与低速空气混合，并发生反应。

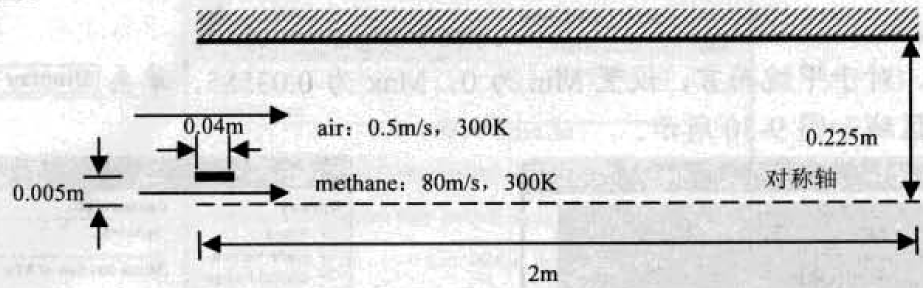


图9-31　圆柱型甲烷火焰燃烧器模型简图

思路分析

本例可选用单步完成反应机制的燃烧模型，即燃料完全燃烧成二氧化碳和水。反应是扩散控制的，故这里应使用涡耗散模型对其进行模拟。

通过本实例的演示过程，读者将学习到：

- 涡耗散模型设置；
- 组分材料定义；
- 反应机理设置；
- 进出口组分浓度定义；
- 燃烧室壁面条件定义；
- 温度分布云图的查看；
- 定压比热分布云图的查看。

结果文件——参见附带光盘"Ch9\sl9-2.msh"、"Ch9\sl9-2.dbs"、"Ch9\sl9-2.jou"、"Ch9\sl9-2.trn"、"Ch9\sl9-2.cas"、"Ch9\sl9-2.dat"。

动画演示——参见附带光盘"Ch9\AVI\sl9-2.avi"。

二、模型建立

1. 启动 GAMBIT，首先建立模型的控制点。→→，在 Create Real Vertex 面板的 x、y、z 坐标输入栏中输入（0，0，0），单击 Apply 按钮生成第一个点，按同样方法建立点（2，0，0）、点（2，0.225，0）、点（0，0.225，0）、点（0，0.005，0）和点（0.04，0.005，0）。为后续网格划分方便，再建立 3 个用于分块划分网格的控制点，坐标分别为（0.04，0，0）、（0.04，0.225，0）和（2，0.005，0），建立好的几何点如图 9-32 所示。

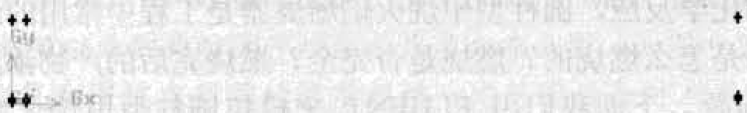


图9-32　建立的控制点

2. 单击 → → ，在 Create Straight Edge 面板中选择点 1（Vertix.1）与点 7（Vertix.7），连接这两点生成线段，按照同样的方法连接其余线段，分别为点 1（Vertix.1）与点 5（Vertix.5）、点 6（Vertix.6）与点 7（Vertix.7）、点 5（Vertix.5）与点 6（Vertix.6）、点 5（Vertix.5）与点 4（Vertix.4）、点 4（Vertix.4）与点 8（Vertix.8）、点 6（Vertix.6）与点 8（Vertix.8）、点 8（Vertix.8）与点 3（Vertix.3）、点 9（Vertix.9）与点 3（Vertix.3）、点 2（Vertix.2）与点 9（Vertix.9）、点 2（Vertix.2）与点 7（Vertix.7）和点 6（Vertix.6）与点 9（Vertix.9）之间的线段，共 12 条线段，如图 9-33 所示。

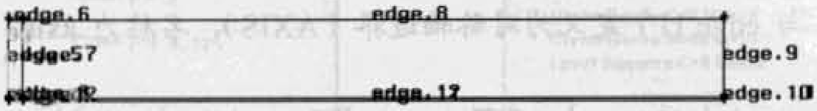


图9-33　建立的线

3. 单击 → → ，在 Create Face from Wireframe 面板中利用 Shift+鼠标左键框选 edge.1 至 edge.4，然后单击 Apply 按钮创建面，其余 3 个面的生成方法与其相同，均为框选各自的 4 条边后单击 Apply 按钮生成，最后生成的面如图 9-34 所示。



图9-34　建立的面

三、网格划分

本例的计算区域划分成了 4 块，中间区域及左侧喷嘴附近的两个区域需要较密的网格。

1. 单击 → → ，在 Mesh Edges 面板的 Edges 中选取线段 1（edge.1）、线段 3（edge.3）和线段 6（edge.6）3 条边，保持 Ratio 值为 1，运用 Interval counte 划分方法，并在左侧输入 4，即划分为 4 个间隔，单击 Apply 按钮，生成这 3 条线的线网格。
2. 按照同样的线网格划分方法，将线段 2（edge.2）、线段 4（edge.4）和线段 10（edge.10）划分为 5 个间隔。
3. 选择线段 8（edge.8）、线段 11（edge.11）和线段 12（edge.12），并保证红色箭头方向为从右向左，改变 Ratio 值为 0.95，运用 Interval counte 划分方法，划分为 100 个间隔。将线段 5（edge.5）、线段 7（edge.7）和线段 9（edge.9）以比例因子 0.9 划分为 22 个间隔，最后生成如图 9-35 所示的线网格。

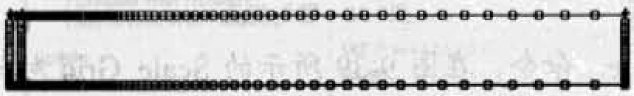


图9-35　划分好的线网格

4. 线网格划分完后，单击 → → ，打开 Mesh Faces 面板，选取 4 个面，运用 Quad 单元与 Map 方法对这 4 个面进行面网格划分，保留其他默认设置，单击 Apply 按钮，生成的面网格如图 9-36 所示。

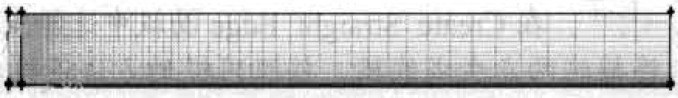


图9-36　划分好的面网格

5. 下面定义边界类型。单击 → ，在 Specify Boundary Types 面板中将甲烷进口（edge.4）定义为速度进口（VELOCITY_INLET），名称为 m-in；将空气进口（edge.5）也定义为速度进口（VELOCITY_INLET），名称为 a-in；将喷嘴壁面（edge.3）定义为壁面边界（WALL），名称为 p-wall；将出口（edge.9）定义为压力出口（PRESSURE_OUTLET），名称为 out；将对称轴（edge.1 与 edge.11）定义为对称轴边界（AXIS），名称为 axis，如图 9-37 所示。

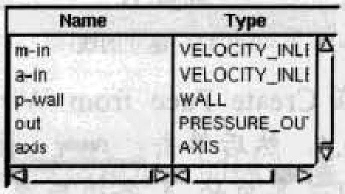


图9-37　边界类型定义

6. 最后执行 File→Export→Mesh 命令，将网格输出为 sl9-2.msh。

四、求解计算

1. 启动 FLUENT 二维单精度计算器，执行 File→Read→Case…命令，读入划分好的网格文件“sl9-2.msh”。
2. 执行 Grid→Check 命令，对网格进行检测，成功检测后窗口界面中最后一行出现“Done”语句。此时，FLUENT 控制台窗口会提示如图 9-38 所示的警告信息，意为提示我们将问题修改为轴对称问题。这里我们先不管它。

```
                default-interior
                m-in
                a-in
                p-wall
                out
                axis
                wall
                fluid
                creating p-wall-shadow
            shell conduction zones,
        Done.
        Warning: The use of axis boundary conditions is not appropriate for
                 a 2D/3D flow problem. Please consider changing the zone
                 type to symmetry or wall, or the problem to axisymmetric.

        Warning: The use of axis boundary conditions is not appropriate for
                 a 2D/3D flow problem. Please consider changing the zone
                 type to symmetry or wall, or the problem to axisymmetric.
```

图9-38　警告信息

3. 执行 Grid→Scale…命令，在图 9-39 所示的 Scale Grid 对话框中设置计算区域的尺寸和单位制。由于本例模型在 GAMBIT 中是按 m 生成的，故保持默认设置即可，单击 Close 按钮关闭 Scale Grid 对话框。
4. 执行 Define→Models→Solver…命令，弹出 Solver 对话框，本例为对称问题，故选择 Space 栏中的 Axisymmetric，如图 9-40 所示，其余保持默认，单击 OK 按钮。

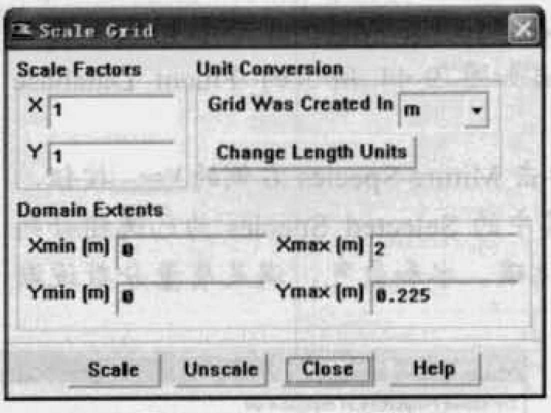


图9-39　Scale Grid 对话框

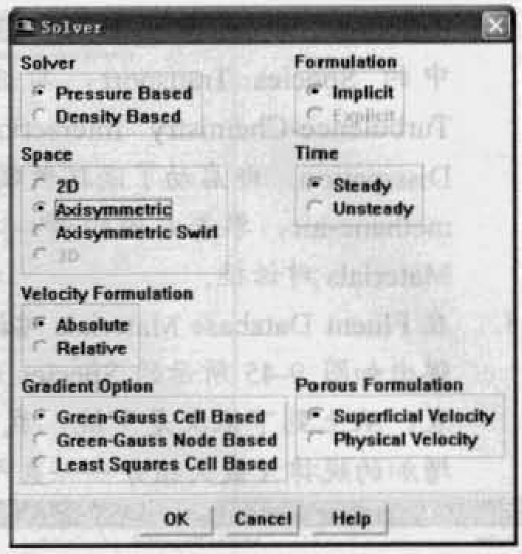


图9-40　Solver 对话框

5. 与上例一样，本例也需要启动能量方程计算，执行 Define→Models→Energy…命令，勾选 Energy Equation 选项，如图 9-41 所示。

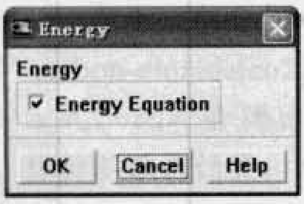


图9-41　启用能量方程

6. 本例的甲烷流速较大，故应为湍流流动。执行 Define→Models→Viscous…命令，弹出如图 9-42 所示的 Viscous Model 对话框，在 Model 栏中选择 k-epsilon[2 eqn]，在 k-epsilon Model 栏中选择 Standard，保留其他默认设置，单击 OK 按钮。

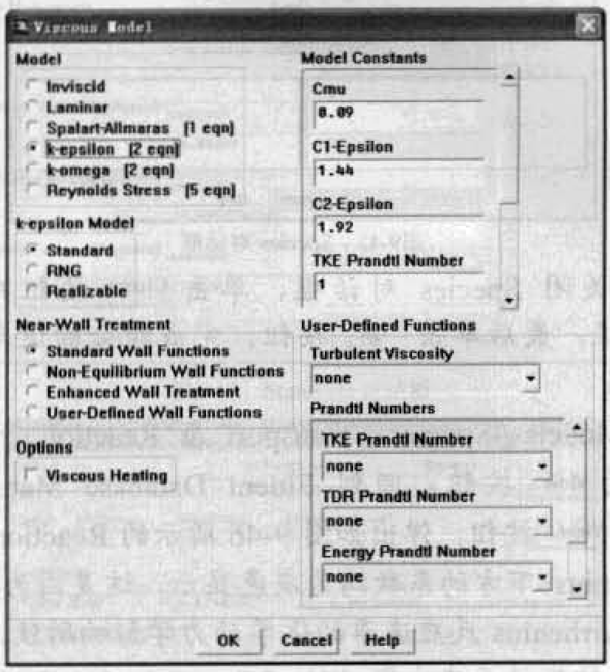


图9-42　湍流模型设置

7. 启用组分输运与化学反应模型。执行 Define→Models→Species→Transport &

Reaction...命令，弹出如图 9-43 所示的 Species Model 对话框，选择 Model 栏中的 Species Transport，勾选 Reactions 栏中的 Volumetric 选项，此时 Turbulence-Chemistry Interaction 下方出现几个选项，本例选择 Eddy-Dissipation，即启动了涡耗散模型。接着在 Mixture Material 下拉列表中选择 methane-air，单击右侧的 View... 按钮，弹出如图 9-44 所示的 Fluent Database Materials 对话框。

8. 在 Fluent Database Materials 对话框中，单击 Miture Species 右侧的 View... 按钮，弹出如图 9-45 所示的 Species 对话框，其中的 Selected Species 为已选组分列表，从上到下依次是甲烷、氧气、二氧化碳、水和氮气，满足质量分数逐渐增加的规律（最大组分——氮气在最下端）。

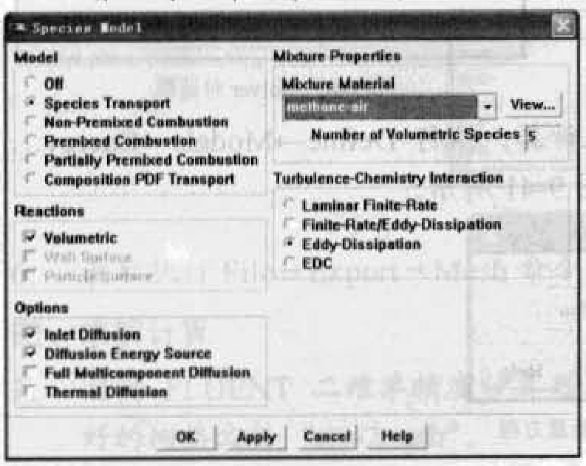


图9-43 Species Model 对话框

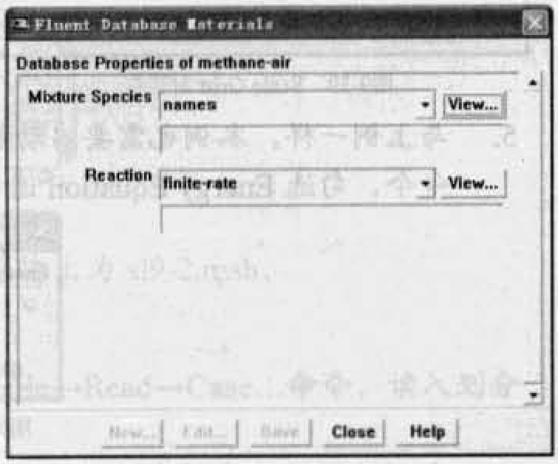


图9-44 Fluent Database Materials 对话框

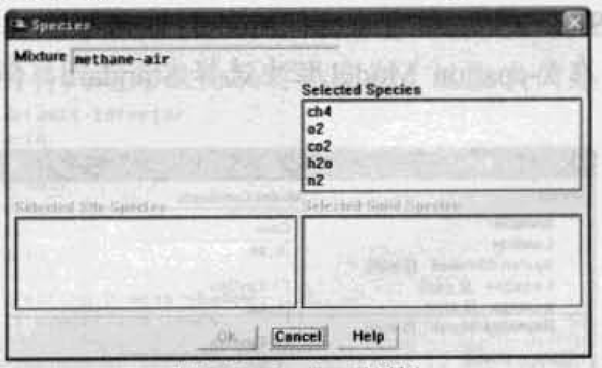


图9-45 Species 对话框

9. 单击 Cancel 按钮关闭 Species 对话框，单击 Close 按钮关闭 Fluent Database Materials 对话框，最后单击 OK 按钮，完成组分输运与化学反应模型的定义。

10. 执行 Define→Models→Species→Transport & Reaction...命令，单击 Mixture Material 右侧的 View... 按钮，回到 Fluent Database Materials 对话框，单击 Reaction 右侧的 View... 按钮，弹出如图 9-46 所示的 Reactions 对话框。从中我们可以看到 Arrhenius 下方的系数均为灰色显示，这是因为我们选用了涡耗散模型，而忽略了 Arrhenius 反应速率的化学动力学影响所致。Reactions 对话框还反映了本例完成的化学反应方程 $CH_4+2O_2 \rightarrow CO_2+2H_2O$。保持对话框中所有默认设置，单击 OK 按钮。

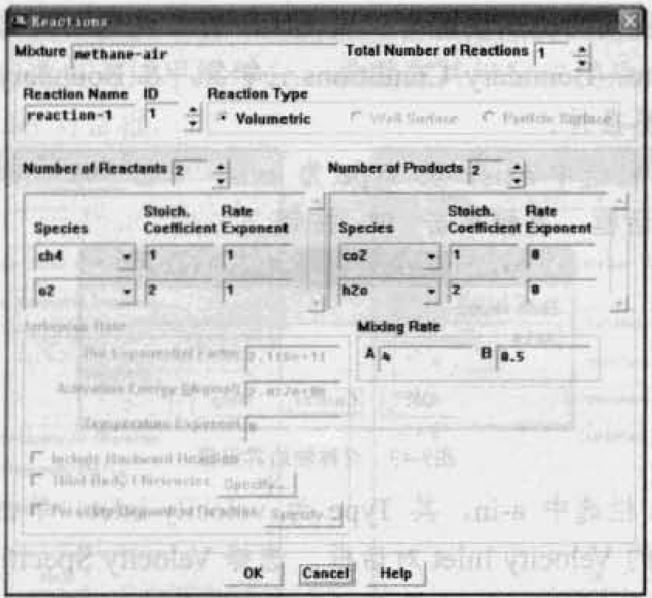


图9-46　Reactions 对话框

11. 下一步设置材料的比热。由于燃烧产生的高温会使各组分的比热随温度发生变化，故执行 Define→Materials 命令，在图 9-47 所示的 Materials 对话框中选择类型为 fluid，先选择 carbon-dioxide[co2]，设置其 Cp 为 piecewise-polynomial（分段多项式）方式，此时会弹出如图 9-48 所示的 Piecewise-Polynomial Profile 对话框，保持其默认设置，单击 OK 按钮。回到 Materials 对话框中单击 Change/Create 按钮保存设置。

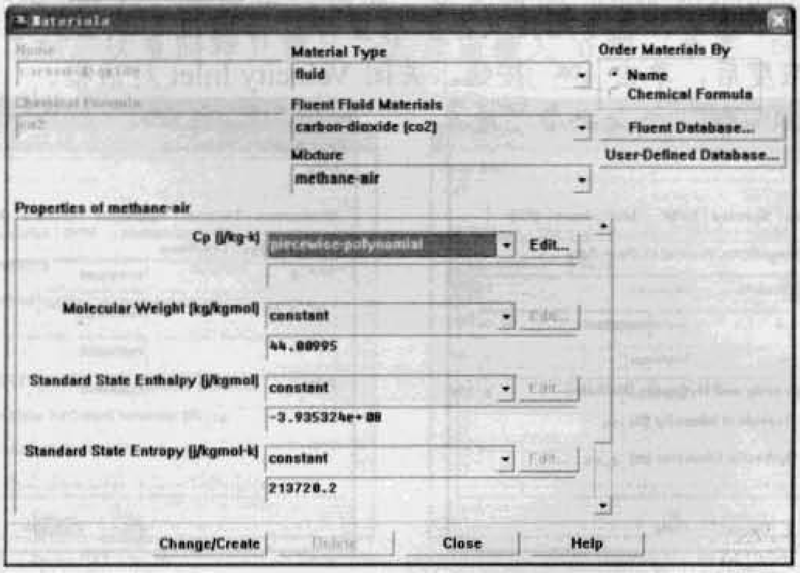


图9-47　Materials 对话框

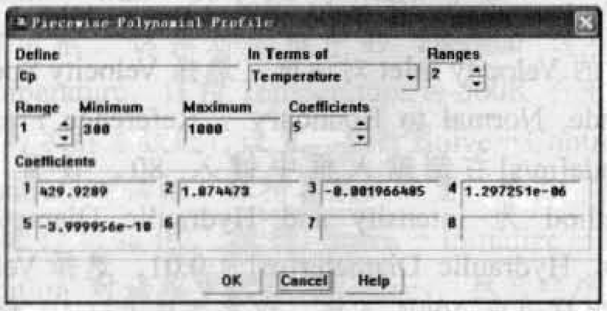


图9-48　Piecewise-Polynomial Profile

甲烷、氧气、水、氮气的比热设置与二氧化碳一样，这里不再详述。

12. 执行单击 Define→Boundary Conditions...命令，在 Boundary Conditions 对话框中定义如下边界条件。

- 在左边的 Zone 栏选中 axis，其 Type 为 axis，单击 Set... 按钮，打开如图 9-49 所示的 Axis 对话框，直接单击 OK 按钮。

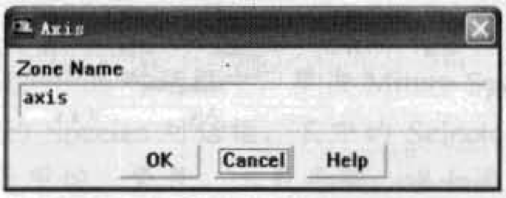


图9-49 对称轴边界设置

- 在左边的 Zone 栏选中 a-in，其 Type 为 velocity-inlet，单击 Set... 按钮，打开如图 9-50 所示的 Velocity Inlet 对话框。选择 Velocity Specification Method 的方式为 “Magnitude, Normal to Boundary”，Reference Frame 为 Absolute。在 Velocity Magnitude[m/s] 右侧输入框中输入 0.5。选择 Turbulence 的 Specification Method 为 Intensity and Hydraulic Diameter，设置 Turbulent Intensity[%]为 10，Hydraulic Diameter[m]为 0.44。然后选择 Velocity Inlet 对话框中的 Thermal 选项卡，保持温度 300K 不变。选择 Species 选项卡，如图 9-51 所示，在 Species Mass Fractions 下方有 ch4、o2、co2、h2o，这里只需在 o2 后面输入 0.23。因为空气中只包含氧气和氮气，而氮气为质量分数最大的组分，在这里不显示，也不用定义，其质量分数将通过 1 减去其他组分求得。设置完组分浓度后，单击 OK 按钮，关闭 Velocity Inlet 对话框。

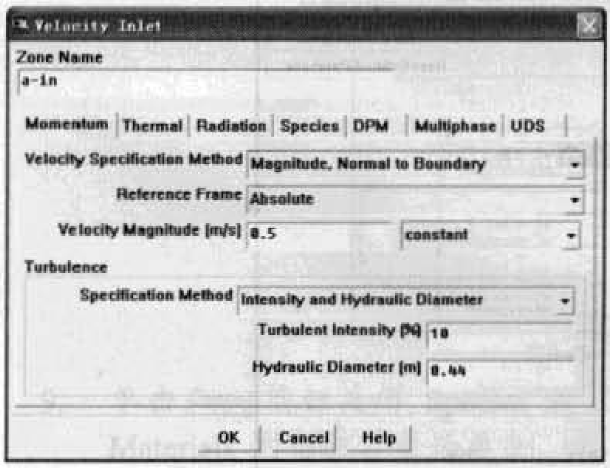


图9-50 空气进口边界定义

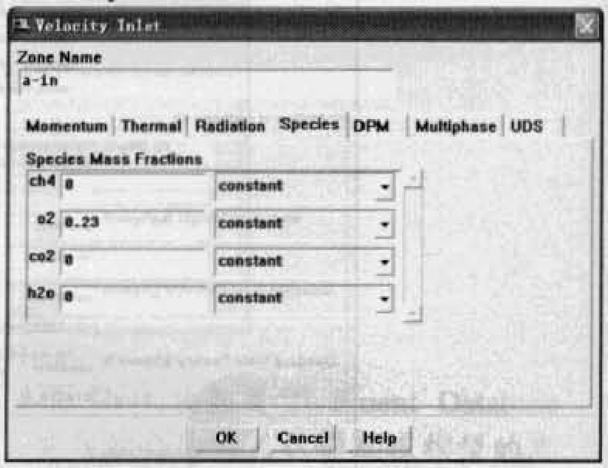


图9-51 空气进口组分定义

- 在左边的 Zone 栏选中 m-in，其 Type 也为 velocity-inlet，单击 Set... 按钮，打开如图 9-52 所示的 Velocity Inlet 对话框。选择 Velocity Specification Method 的方式为 “Magnitude, Normal to Boundary”，Reference Frame 为 Absolute。在 Velocity Magnitude[m/s] 右侧输入框中键入 80。设置 Turbulence 栏中的 Specification Method 为 Intensity and Hydraulic Diameter，设置 Turbulent Intensity[%]为 10，Hydraulic Diameter[m]为 0.01。选择 Velocity Inlet 对话框中的 Thermal 栏，保持温度 300K 不变。接着选择 Species 栏，如图 9-53 所示，

在 Species Mass Fractions 下方有 ch4、o2、co2、h2o，这里只需在 ch4 后面输入 1，因为甲烷进口为纯甲烷组分。设置完其组分浓度后，单击 OK 按钮，关闭 Velocity Inlet 对话框。

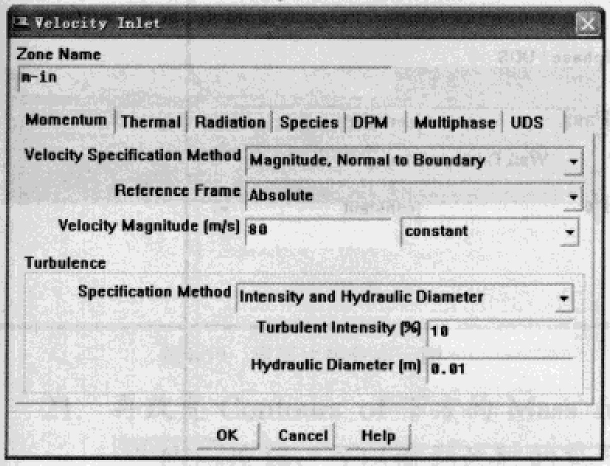


图9-52　甲烷进口速度定义

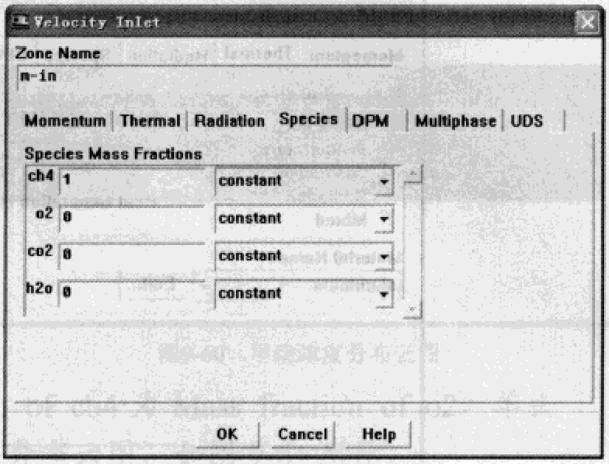


图9-53　甲烷进口组分定义

- 在左边的 Zone 栏选中 out，其 Type 为 pressure-outlet，单击 Set... 按钮，打开如图 9-54 所示的 Pressure Outlet 对话框。保持 Gauge Pressure[pascal]为 0，即环境气压为 1 个大气压。选择 Turbulence 的 Specification Method 为 Intensity and Hydraulic Diameter，设置 Turbulent Intensity[%]为 10，Hydraulic Diameter[m]为 0.45。然后选择对话框中的 Thermal 栏，保持温度 300K 不变。接着选择 Species 栏，如图 9-55 所示，在 Species Mass Fractions 下方有 ch4、o2、co2、h2o，这里同样只需在 o2 后面输入 0.23。单击 OK 按钮，关闭 Pressure Outlet 对话框。

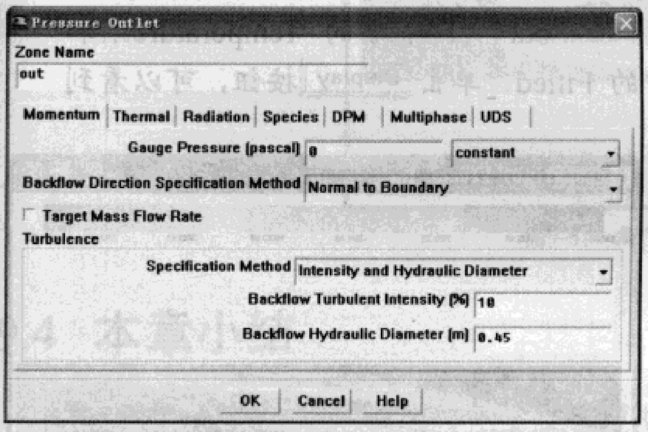


图9-54　压强出口定义

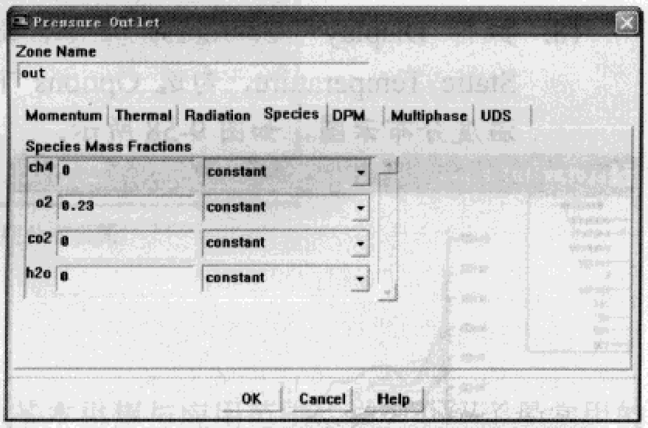


图9-55　压强出口组分定义

- 在左边的 Zone 栏选中 wall，其 Type 为 wall，单击 Set... 按钮，打开如图 9-56 所示的 Wall 对话框。选择对话框中的 Thermal 选项卡，设置 Thermal Conditions 为 Temperature，保持 Temperature 为 300K 不变，单击 OK 按钮。

13. 边界定义完后，对求解参数进行设置。执行 Solve→Control→Solution...命令，弹出 Solution Controls 对话框，保持其默认设置，单击 OK 按钮。
14. 接下来对流场进行初始化。执行 Solve→Initialize→Initialize...命令，在 Solution Initialization 对话框中选择 all-zones，然后顺序单击 Init 、Apply 、Close 按钮。

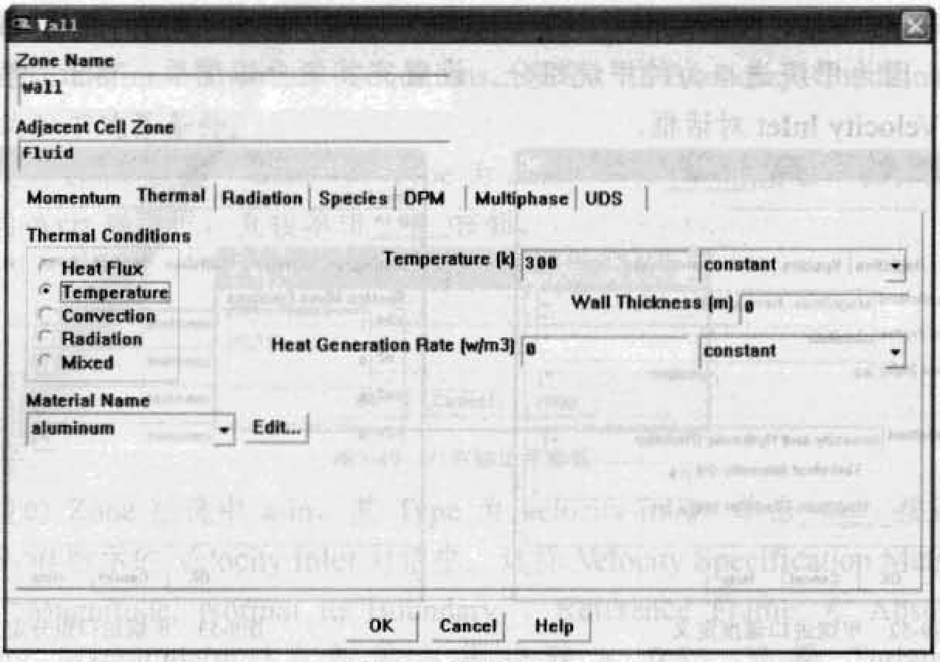


图9-56　壁面边界定义

15. 初始化后执行 Solve→Monitors→Residual...命令，在弹出的 Residual Monitors 对话框中选中 Plot，打开残差曲线图。FLUENT 默认 Criteria 中 energy 的收敛精度要求为 1e-6，其余的为 0.001，本例保持其默认设置，单击 OK 按钮。

16. 完成上述步骤的设置后，执行 File→Write→Case...命令，将工程文件保存为 sl9-2.cas。

17. 执行 Solve→Iterate...命令，设置迭代步为 500，单击 Iterate 按钮开始解算。迭代至 225 步时，问题收敛，其残差曲线如图 9-57 所示。

18. 执行 Display→Contours...命令，选择 Contours of 下方的 Temperature...和 Static Temperature，勾选 Options 下方的 Filled，单击 Display 按钮，可以看到温度分布云图，如图 9-58 所示。

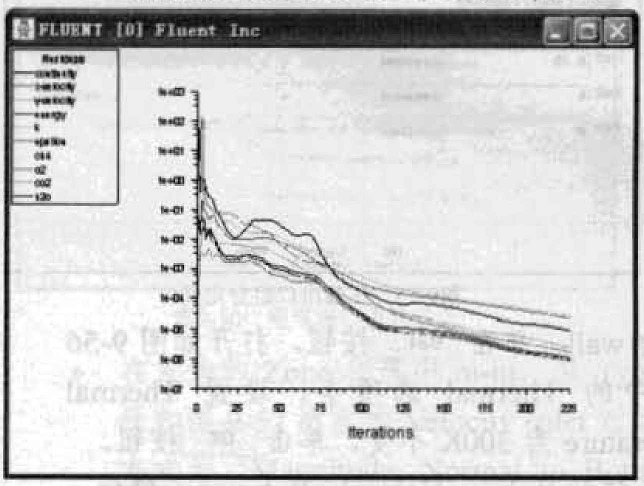


图9-57　残差曲线

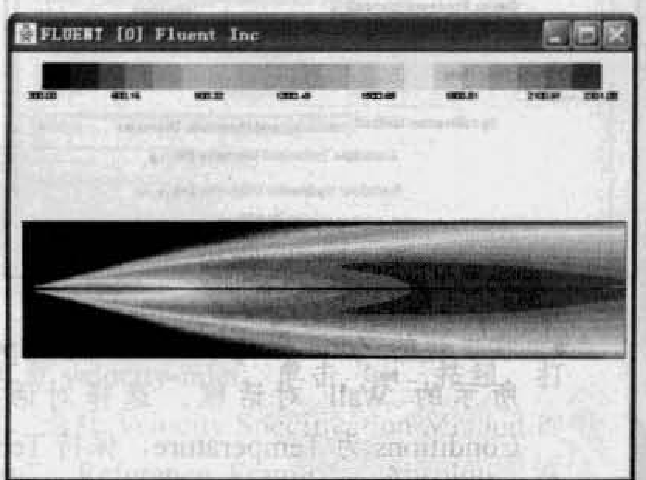


图9-58　温度分布云图

19. 改变 Contours of 下方的选项为 Properties...和 Specific Heat[Cp]，单击 Display 按钮，可以看到定压比热的分布云图，如图 9-59 所示。

20. 改变 Contours of 下方的选项为 Species...和 Mass fraction of ch4，单击 Display 按钮，可以看到此时的甲烷浓度分布云图，如图 9-60 所示。

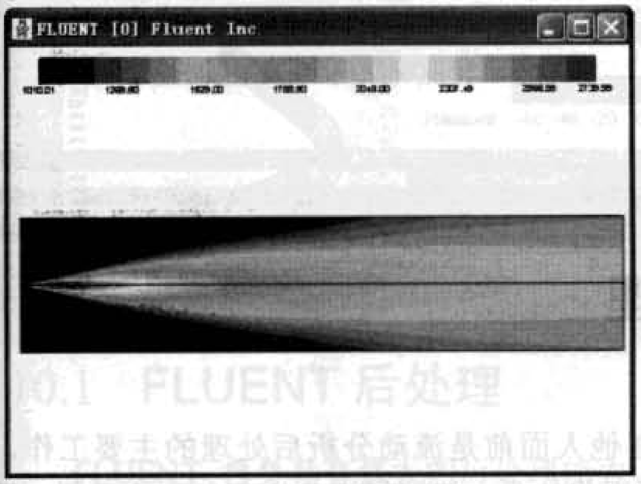


图9-59 定压比热分布云图

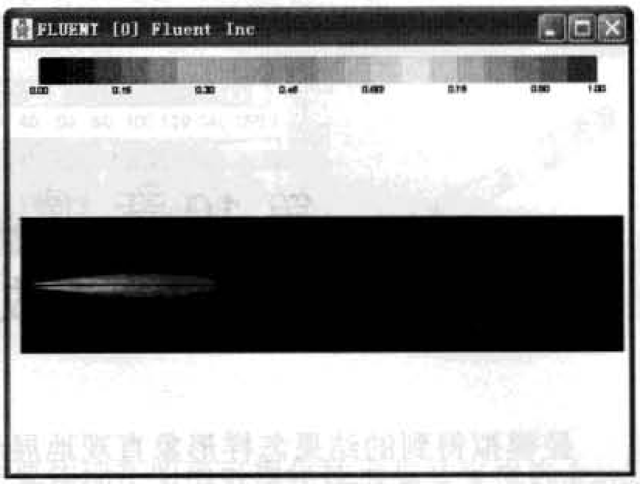


图9-60 甲烷浓度分布云图

21. 再改变 Contours of 下方的 Mass fraction of ch4 为 Mass fraction of o2，单击 **Display** 按钮，可以看到此时的氧气浓度分布云图，如图 9-61 所示。
22. 查看完相关云图后，执行 File→Write→Data…命令，保存结果文件为 sl9-2.dat。
23. 最后执行 File→Exit 命令，安全退出 FLUENT。

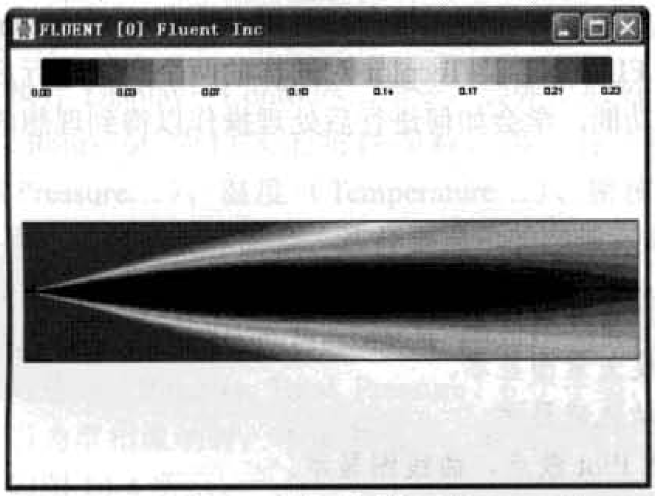


图9-61 氧气浓度分布云图

9.4 本章小结

本章主要讲述了组分输运与化学反应模型的基本思想与应用范围，详细介绍了最常用的燃烧模型——通用有限速率模型。通过含硫天然气泄漏扩散模拟和圆柱型甲烷火焰燃烧器模拟分别演示了组分输运与化学反应两种问题的模拟过程，帮助读者了解利用 FLUENT 求解相关问题的思路，熟悉解算组分输运与化学反应问题的操作过程，为解决相关实际工程问题打下基础。

备忘录

- 组分输运与化学反应模型概述。
- 通用有限速率模型思想。
- 利用 FLUENT 解决组分输运与化学反应问题的操作过程。

第 10 章 流动分析后处理

经模拟得到的结果怎样形象直观地展示在他人面前是流动分析后处理的主要工作。FLUENT 自身具备强大的后处理功能及图形可视化技术，能够显示各物理参数的云图、等值线图、速度矢量图、流动轨迹图等，同时还能求得力、力矩及对应的力矩系数、流量等，并生成简要的计算报告。除了应用 FLUENT 自身所带的这些功能外，读者还可以借助 Tecplot 软件进行流动后处理分析，它是 Amtec 公司推出的一个功能强大的科学绘图软件，不仅可以绘制二维图形、函数曲线，而且可以进行三维面绘图和三维体绘图，并提供了多种图形格式，且界面友好、易学易用。

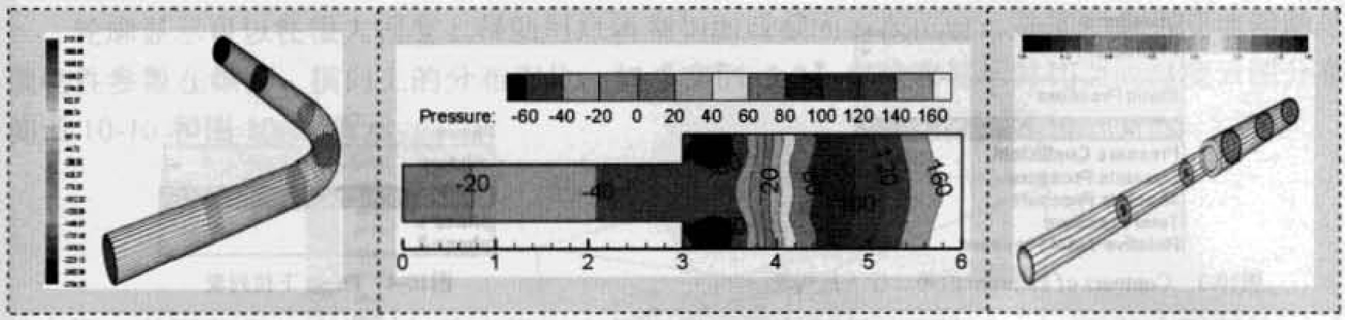
本章针对流动分析后处理的需要，将介绍利用 FLUENT 及 Tecplot 进行模拟结果后处理的操作过程。通过利用 FLUENT 及 Tecplot 对同样的两个实例进行后处理的讲解，帮助读者熟悉两个软件的后处理功能，学会如何进行后处理操作以得到理想的分析结果。

本章要点

- FLUENT 的云图与等值线显示。
- FLUENT 的速度矢量图显示。
- FLUENT 的流动轨迹显示。
- FLUENT 的 XY Plot 散点、曲线图显示。
- FLUENT 的流场函数的定义。
- FLUENT 的数据显示与文字报告。
- Tecplot 网格与标尺的设定。
- Tecplot 的等值线图的显示。
- Tecplot 的矢量图的绘制。
- Tecplot 的 XY 曲线绘制。

本章案例

- FLUENT 二维流动后处理实例——突扩管内流体流动。
- FLUENT 三维流动后处理实例——弯管内油水两相流动。
- Tecplot 二维流动后处理实例——突扩管内流体流动。
- Tecplot 三维流动后处理实例——弯管内油水两相流动。



10.1 FLUENT 后处理

FLUENT 自身具有强大的后处理能力，主要体现在图形可视化技术与文字报告上，下面对其相关后处理功能进行详细介绍。

10.1.1 FLUENT 的图形及可视化技术

FLUENT 的图形及可视化技术主要是将流场分布以云图、等值线图、矢量图等形式呈现出来，通过这些图形的显示可以帮助用户分析流场的变化及相关物理参数的分布。

一、云图与等值线显示

迭代计算结束后，执行 Display→Contours...命令，会弹出如图 10-1 所示的 Contours 对话框。该对话框的 Contours of 为待选的物性参数，第一行下拉列表中主要包括速度（Velocity...）、压强（Pressure...）、温度（Temperature...）、密度（Density...）等物性参数，如图 10-2 所示。用户可根据实际需要，选择要显示的参数。第二行下拉列表为要显示物性参数的二级细化分类，如压强（Pressure...）还分有静压（Static Pressure）、压力系数（Pressure Coefficient）、动压（Dynamic Pressure）、绝对压强（Absolute Pressure）、总压（Total Pressure）和相对总压（Relative Total Pressure）6 个子类，如图 10-3 所示。对话框中的 Phase 为相选择，当为单相流动时，不需要选择，若为多相流动时，可以在下拉列表中选择混合相或各单相，如图 10-4 所示。

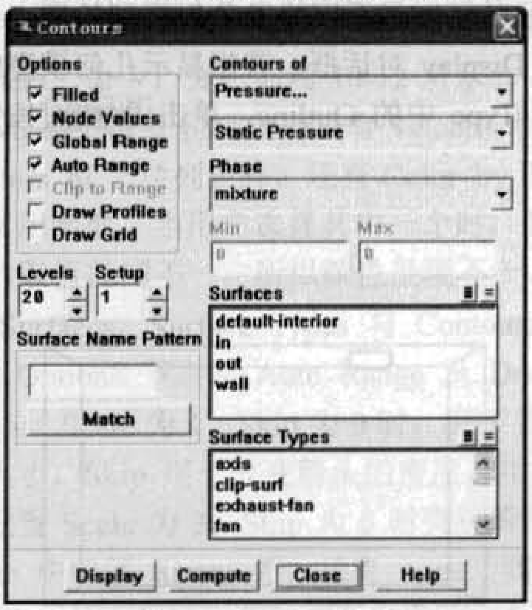


图10-1 Contours 对话框

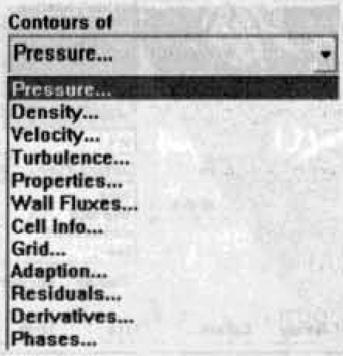


图10-2 Contours of 第一行下拉列表

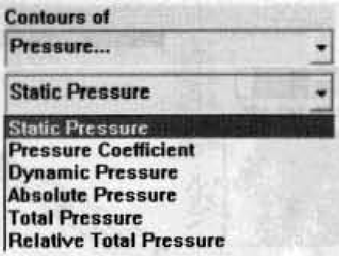


图10-3 Contours of Pressure 的第二行下拉列表

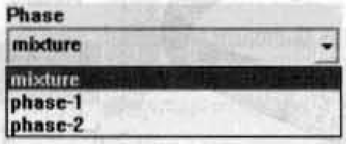


图10-4 Phase 下拉列表

对话框中的 Surfaces 为可以显示的面，通常包含边界定义时的进出口及壁面等，用户还可以自定义相关的切面或截面，通过选择 Surfaces 下的选项以显示对应面的物性参数分布。对于二维问题，通常不需要选择 Surfaces，因为二维问题本身就是一个面。Surface Type 为面的类型，当要显示的面惟一确定时，可以不用对其类型进一步定义。

Contours 对话框左侧的 Options 下方有几个重要的选项，若 Filled 被勾选，则会显示云图，若不勾选，则显示的为等值线图。突扩管速度云图与等值线图如图 10-5 和图 10-6 所示。

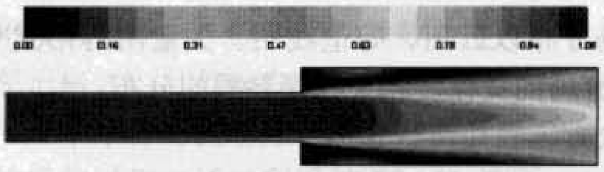


图10-5 速度云图

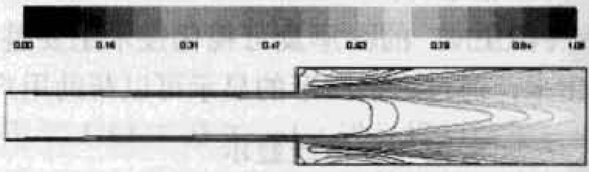


图10-6 速度等值线图

当 Auto Range 选中时为全范围显示，当不勾选 Auto Range 时，则系统自动勾选 Clip to Range，用户此时可以在 Min 与 Max 中输入要显示的上下限。如设置突扩管的速度上限为 0.8m/s，下限为 0.2m/s，则显示的云图如 10-7 所示。

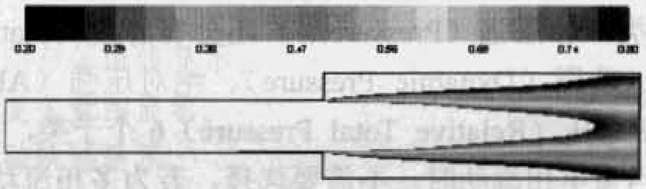


图10-7 改变上下限后的速度云图

Draw Grid 可以帮助用户在云图和等值线图显示的同时显示网格及几何模型轮廓，当勾选 Draw Grid 时，自动弹出如图 10-8 所示的 Grid Display 对话框。若想显示几何模型的轮廓，可以勾选 Options 下方的 Edges，并选择 Edge Type 中的 Outline，单击 Display 按钮即可，如第 5 章【实例 5-2】的轮廓如图 10-9 所示。



图10-8 Grid Display 对话框

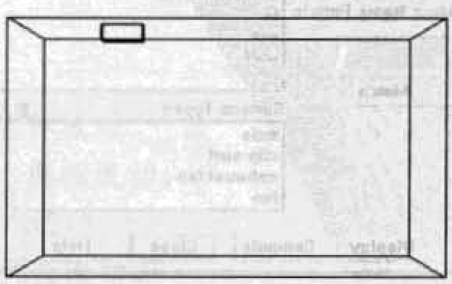


图10-9 【实例 5-2】的轮廓图

轮廓显示可以在很大程度上帮助用户辨别切面或截面所在位置，并能形象直观地辅助呈现物性参数在纵向、横向上的分布变化，如【实例 5-2】有轮廓显示时切面的温度云图分布如图 10-10 和图 10-11 所示。

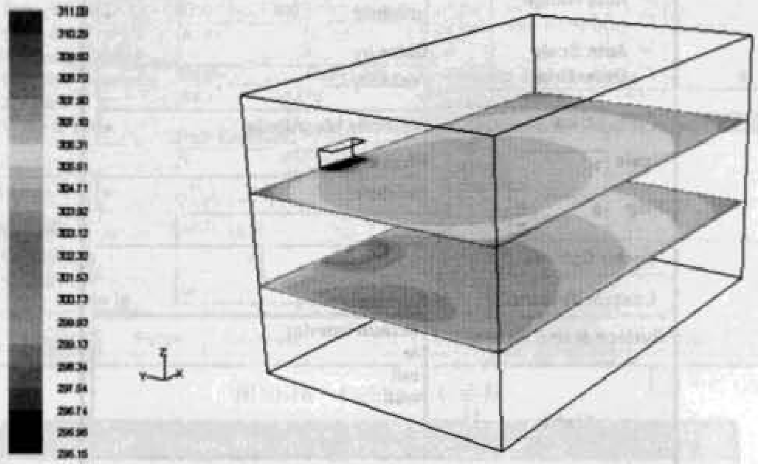


图10-10　【实例 5-2】有轮廓的横切面温度云图

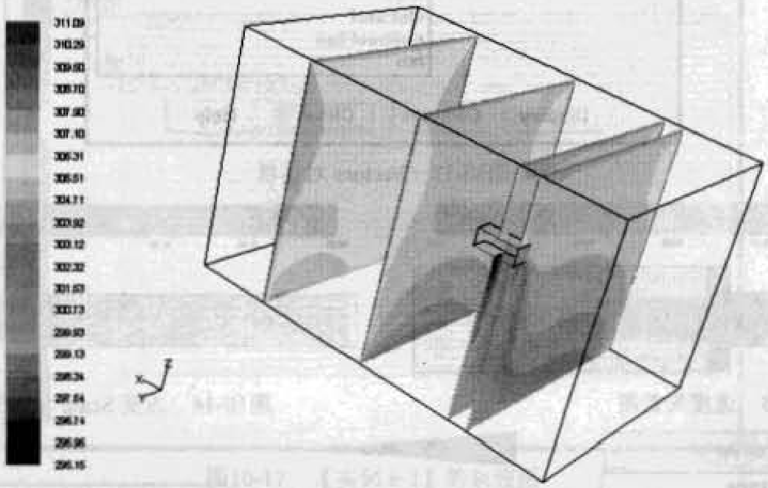


图10-11　【实例 5-2】有轮廓的垂切面温度云图

二、速度矢量图显示

除了云图与等值线图外，用户还常用速度矢量图反映流体的运动情况。执行 Display→Vectors...命令，弹出如图 10-12 所示的 Vectors 对话框，该对话框与 Contours 对话框相似，但 Vectors of 下拉列表中只有 Velocity 和 Relative Velocity，因为只能显示速度矢量图。除了 Vectors of 下拉列表外，还有 Color by 下拉列表，该列表中包含 Pressure、Density、Velocity 等常用参数，当用户选择其中一个时，显示的矢量图的数值为该参数对应的数值，由于各参数的取值范围不一，所以颜色呈现不一。通常选择 Velocity，以显示速度矢量图。对话框中的 Surfaces、Surface Types 与 Contours 对话框中的一样，均为待显示的面及面的类型。同样，Options 下方的 Auto Range 及 Draw Grid 用法也与云图显示时一致。当默认 Style 为 arrow、Scale 为 1、Skip 为 0 时，突扩管的速度矢量图如图 10-13 所示。Scale 用于改变箭头的大小，Skip 用于改变箭头的密度，用户可以调节 Scale 及 Skip 以使得矢量图清晰呈现。当设置 Scale 为 3，Skip 为 5 时突扩管的速度矢量图如图 10-14 所示，较图 10-13 要清晰。Style 中除了 arrow 外，还有 cone（圆锥体）、filled-arrow（实心箭头）、harpoon（鱼叉）、headless（无头线）等种类，如图 10-15 所示。

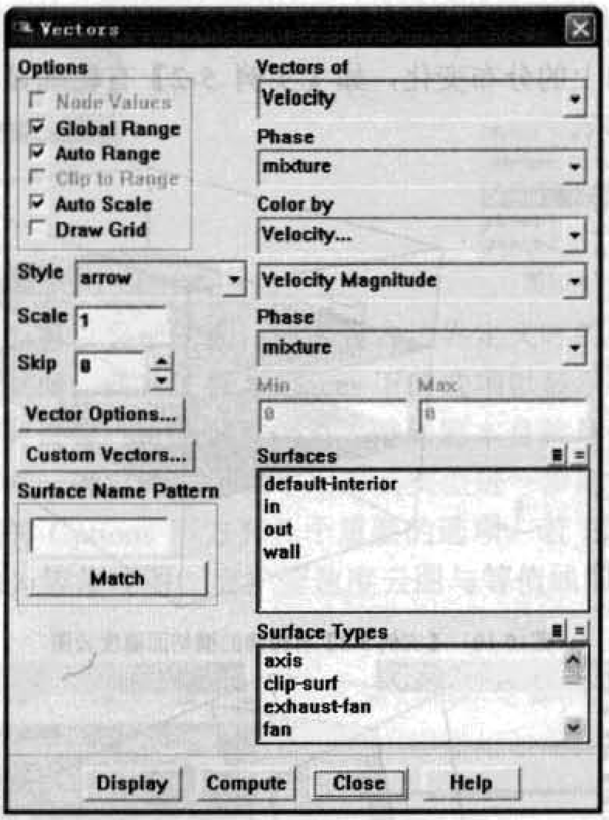


图10-12 Vectors 对话框

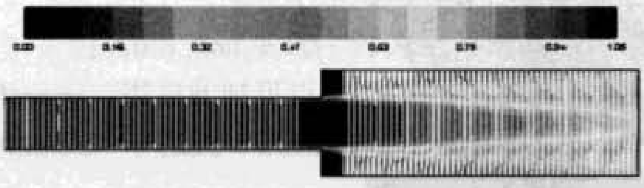


图10-13 速度矢量图

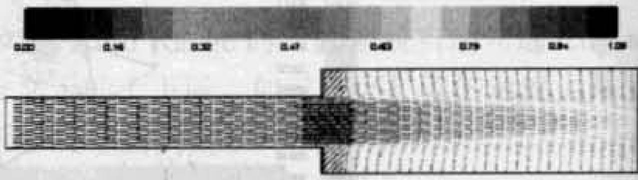


图10-14 改变 Scale 与 Skip 后的速度矢量图

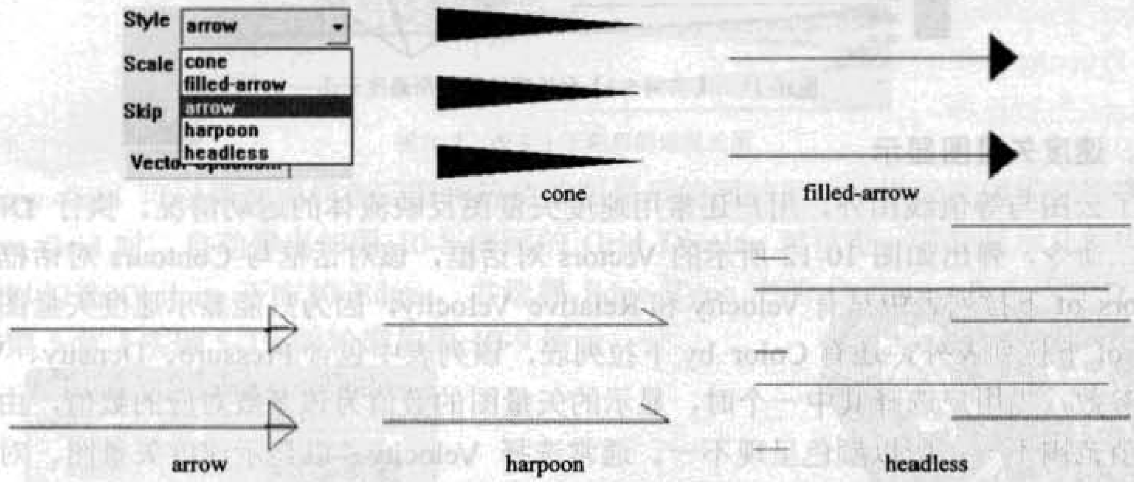


图10-15 Style 的种类

三、流动轨迹显示

非定常问题可以显示流体的流动轨迹，执行 Display→Pathlines...命令，弹出如图 10-16 所示的 Pathlines 对话框。Release from Surfaces 为粒子轨迹的初始源面；Step Size 为长度间隔，用于计算下一微粒的位置；Steps 为步数，通常应为一个微粒能够前进的最大步数，Step Size 与 Steps 的乘积近似等于路径长度。【实例 6-1】的轨迹图如图 10-17 所示。

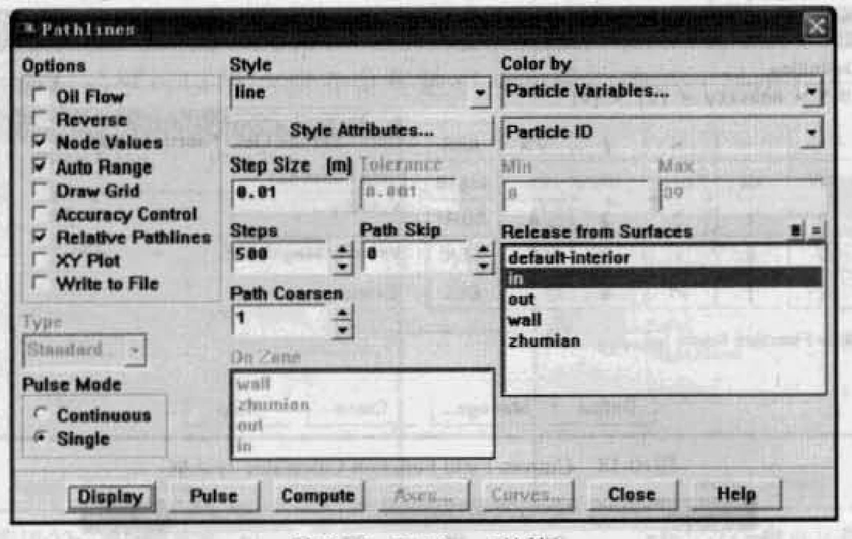


图10-16 Pathlines 对话框

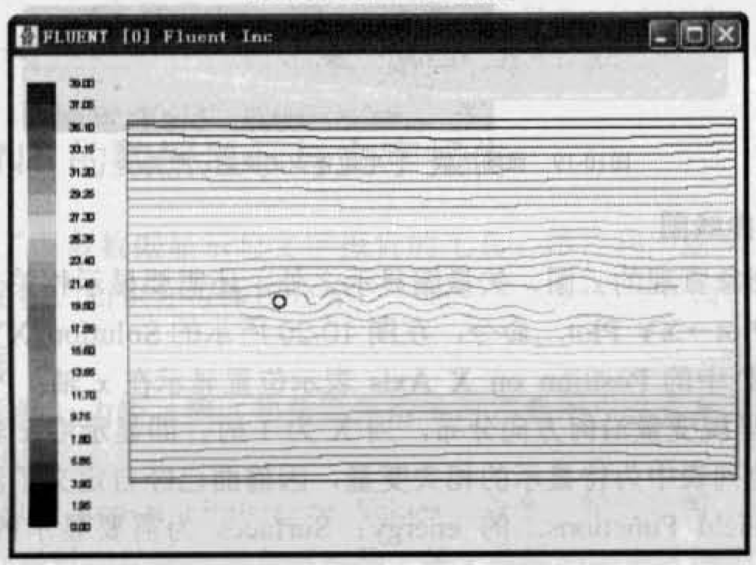


图10-17 【实例 6-1】的轨迹图

四、流场函数的定义

有时除了要呈现 FLUENT 自带的物性参数分布之外，还需要显示一些特殊的物理变量分布。这时就需要借助流场函数的定义，执行 Define→Custom Field Function Calculator…命令，弹出如图 10-18 所示的自定义流场函数对话框。Definition 下方的输入栏会即时呈现出要定义的函数表达式，但是这里不是从键盘输入公式，而是从对话框中选取需要用到的数字或变量，在 Select Operand Field Functions from 下方提供了 FLUENT 自带的流场变量，基本的数学关系及函数在对话框左侧可以选择。如对【实例 4-2】定义一个单位体积动能的函数，则需要依次单击对话框中的“0”、“.”、“5”、“×”，然后在 Select Operand Field Functions from 中选择 Density，并按下 Select 按钮，接着单击“×”，再在 Select Operand Field Functions from 中选择 Velocity，按下 Select 按钮，再次单击“×”及选择一次 Velocity，即会出现如图 10-18 所示的数学表达式。最后需要在 New Function Name 中输入定义好的函数名称，单击 Define 按钮完成流场函数的定义。

定义好流场函数后，Contours 对话框的 Contours of 下拉列表中会出现 Custom Field Functions…（自定义流场函数）选项，选择定义好的 energy，单击 Display 按钮则可见【实例 4-2】的单位体积动能的云图，如图 10-19 所示。

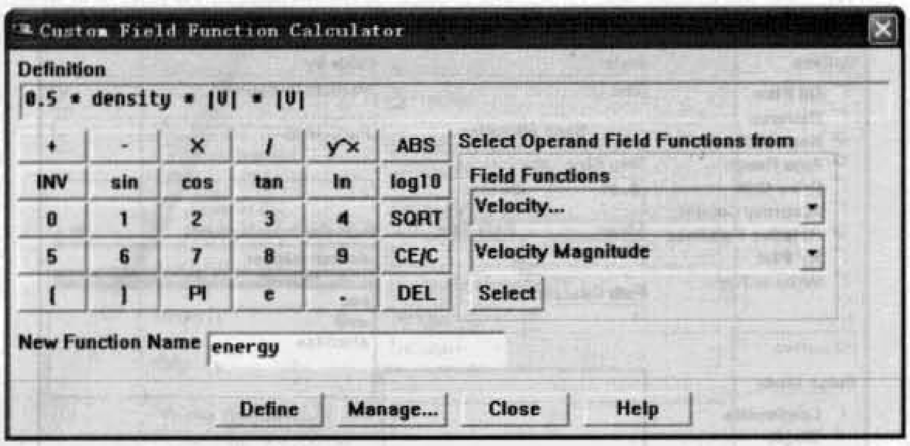


图10-18　Custom Field Function Calculator 对话框

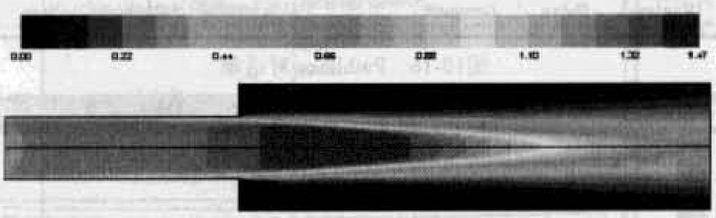


图10-19　流场函数——单位体积动能的云图显示

五、XY 散点及曲线图

有时除了需要形象直观的云图、矢量图显示之外，还需要显示相关变量的坐标曲线图。这时读者可以执行 Plot→XY Plot...命令，在图 10-20 所示的 Solution XY Plot 对话框中进行显示设置。Options 栏中的 Position on X Axis 表示位置显示在 x 轴；Plot Direction 栏中的 X、Y、Z 表示需要呈现变量沿何方向分布，当 X 为 1 时，即显示沿 x 轴方向的变化情况；Y Axis Function 下拉列表中为待显示的相关变量，因前面已经自定义了流场函数，因此这里可以选择 Custom Field Functions...的 energy；Surfaces 为需要显示的面，对于二维问题 Surfaces 可为线。

我们显示一下【实例 4-2】的单位体积动能沿 x 轴方向的变化情况，设置如图 10-20 所示，单击 Plot 按钮后动能分布如图 10-21 所示。

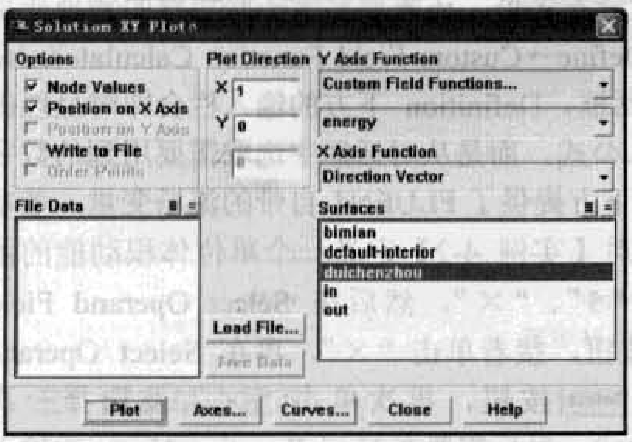


图10-20　Solution XY Plot 对话框

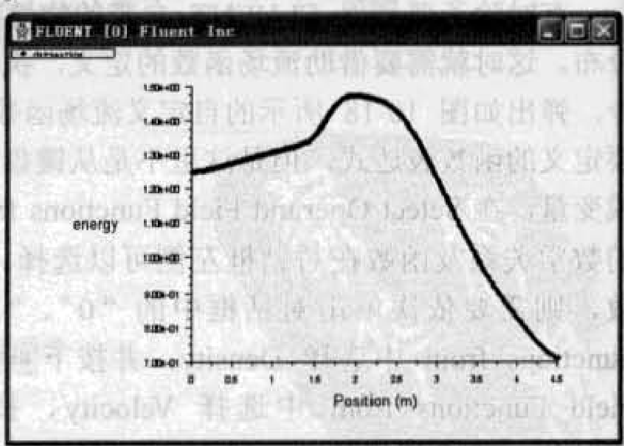


图10-21　单位体积动能沿 x 轴方向的分布

单击 Solution XY Plot 对话框中的 Axes... 按钮，会弹出如图 10-22 所示的 Axes-Solution XY Plot 对话框，在该对话框中用户可以设置 x、y 轴的数值范围（Auto Range 为全范围显示）和坐标轴数值的显示格式（浮点数、整数等）。

单击 Solution XY Plot 对话框中的 Curves... 按钮，弹出如图 10-23 所示的 Curves-Solution XY Plot 对话框，该对话框可以帮助读者设置散点及曲线的颜色、显示方式和大小等。

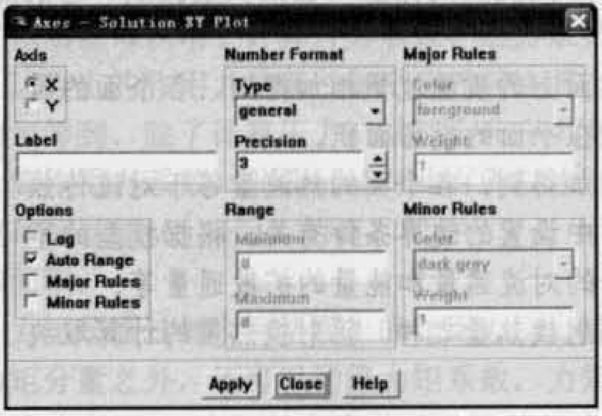


图10-22 坐标轴设置

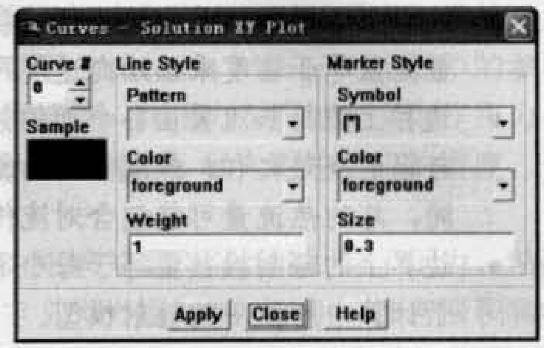


图10-23 散点及曲线设置

注意：当同时显示多条曲线时，通过改变不同曲线的颜色和形状可以有效帮助用户分辨曲线之间的区别。

10.1.2 FLUENT 的数据显示与文字报告

FLUENT 提供了很多数据显示与文字报告的工具。用户利用这些工具可以得到边界流量、作用力、投影面积、面积分与体积分等。下面对各功能进行详细介绍。

一、参考值设定

在计算作用力系数、力矩、熵、热传递系数等时需要用户设置参考值，以用于相关物理量和无因次系数的计算。

在 FLUENT 中执行 Report→Reference Values...命令，弹出如图 10-24 所示的 Reference Values 对话框，用户可以手动输入参考值或基于某个选择的边界区域的物理量的值来计算参考值（Compute From），可以设置的参考值有 Aera、Density、Enthalpy、Leghth Pressure、Temperature、Velocity、Dynamic Viscosity 和 Ratio of Specific Heats 等。

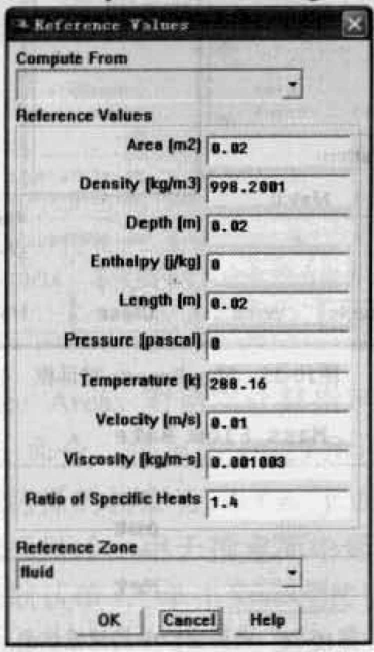


图10-24 Reference Values 对话框

二、边界流量报告

FLUENT 可以生成所选边界区域上的 3 种不同变量的流量，包括质量流量、总的热流量和辐射传热流量。

- 边界上的质量流量由边界区域各个网格面上的质量流量相加得到，各个面的质量流量等于密度乘以法向速度再乘以所在平面的投影面积。
- 边界上的总热流量由各个面的热流量相加得到。各个面的热流量等于对流传热与辐射换热之和。热流量的计算与计算中设置的边界条件有关。根据模型的不同，总的热流量可能包含对流传热、焓的对流通量和能量的扩散通量等。
- 边界上的辐射换热量等于每个面上的辐射换热量之和。辐射换热量的计算取决于计算中所使用的辐射模型。

需要注意的是，FLUENT 在质量和热量平衡计算时，仅仅考虑的是穿过边界而进入和离开主体的流动，不包括用户定义的体积源或颗粒喷射的作用。因此，可能出现质量或热量不守恒的情况。那么，为了判定一个包含离散相的解是否收敛，读者可以把边界流量计算的数值与粒子轨迹报告中得到的质量和热量改变的数值相比较，若两者相等，就可以认为满足守恒条件。

生成流量报告的步骤很简单，只需执行 Report→Fluxes...命令，弹出如图 10-25 所示的 Flux Reports 对话框，Options 栏中包含了 Mass Flow Rate（质量流量）、Total Heat Transfer Rate（总热流量）、Radiation Heat Transfer（辐射换热量），Boundaries 列表为待选的获取流量数据的边界区域。对于【实例 6-1】，选择计算进出口边界的质量流量，单击 Compute 按钮可得边界上的流量数值，并在右下方显示流量总和的结果。另外，在 Flux Reports 对话框显示计算结果的同时，FLUENT 视图窗口中也会显示计算结果的详细信息，如图 10-26 所示。

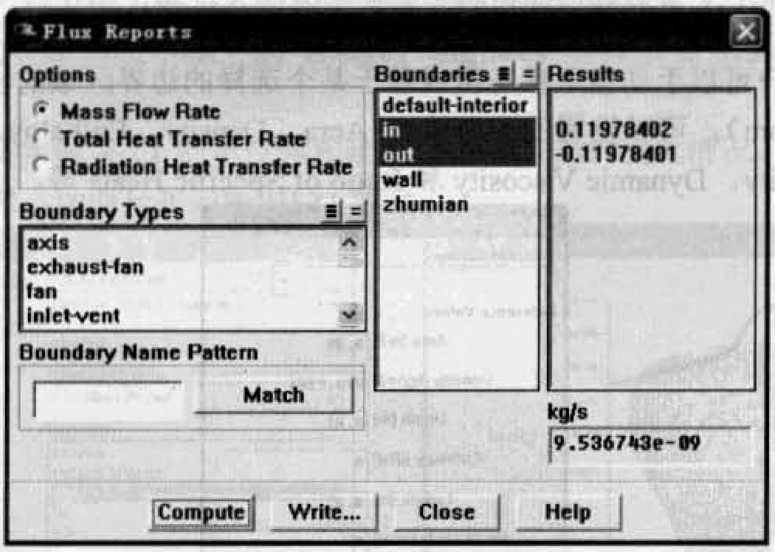


图10-25　Flux Reports 对话框

```
            Mass Flow Rate                  (kg/s)
-------------------------------- --------------------
                        in              0.11978402
                       out             -0.11978401
-------------------------------- --------------------
                       Net           9.5367432e-09
```

图10-26　视图窗口中的流量信息

三、边界作用力报告

FLUENT 可以计算和报告指定方向的作用力及关于选择区域的一个指定中心位置的力矩。该功能可以用于计算升力系数、阻力系数、力矩系数等空气动力学系数。

边界上的作用力是通过每个边界网格面上的压力和粘性力与指定方向的方向矢量的标量积相加等到。除了计算压力、粘性力和合力外，还可以用 Reference Values 对话框中的参考值计算作用力系数，前面已经对此有所叙述，这里不再详谈。作用力系数被定义为作用力与单位体积动能（$\frac{1}{2}\rho v^2 A$）的商，其中 ρ、v、A 为 Reference Values 输入框中给定的密度、速度和面积。

力矩是通过每个网格面上的作用力绕力矩中心的力矩求矢量和得到的。除了压力、粘度和力矩分量之外，还可以计算力矩系数。力矩系数被定义为力矩与参考动压、参考面积和参考长度的商。

最终得到的力和力矩有两种表现形式：有量纲形式和无量纲形式。

执行 Report→Forces...命令，弹出如图 10-27 所示的 Force Reports 对话框，Options 栏包含 Forces（作用力）和 Moments（力矩）。若要生成作用力报告，需要在 Force Vector（作用力矢量）栏中指定作用力方向的 x、y、z 分量；若要生成力矩报告，需要在 Options 栏选择 Moments，然后在 Moment Center（力矩中心）指定力矩中心的 x、y、z 的坐标。Wall Zones 列表中为要计算的待选边界。单击 Print 按钮即可在视图窗口中生成相应的力或力矩报告，【实例 6-1】的作用力报告如图 10-28 所示。

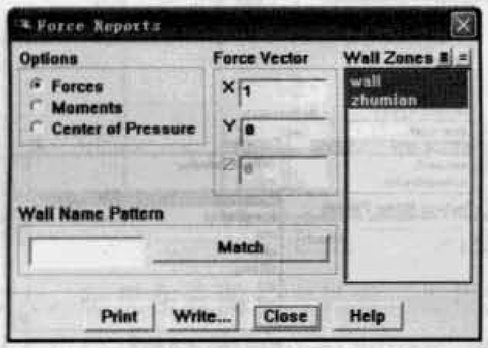


图10-27　Force Reports 对话框

Force vector: (1 0 0)

zone name	pressure force n	viscous force n	total force n	pressure coefficient	viscous coefficient	total coefficient
wall	0	3.7850793e-05	3.7850793e-05	0	0.037919012	0.037919012
zhumian	2.1087946e-05	5.0839089e-06	2.6171855e-05	0.021125953	0.0050930717	0.026219025
net	2.1087946e-05	4.2934702e-05	6.4022649e-05	0.021125953	0.043012084	0.064138038

图10-28　【实例 6-1】的作用力报告

四、投影面积计算

用户可以利用 Projected Surface Areas 对话框计算指定的面沿 x、y 或 z 方向的投影面积。执行 Report→Projected Areas...命令，弹出图 10-29 所示的 Projected Surface Areas 对话框，其中 Projection Direction 为要选择的投影方向（x、y 或 z），Surfaces 为要计算投影面积的面，Min Feature Size 为最小特征尺寸，用于指定面中最小的几何构形的长度（若不能确定最小几何特征尺寸，也可以使用默认值），单击 Compute 按钮，计算值就会出现在 Area 框和视图窗口中。【实例 5-2】的 kongtiaobi 沿 x 方向的投影面积为 0.04m^2，如图 10-30 所示。

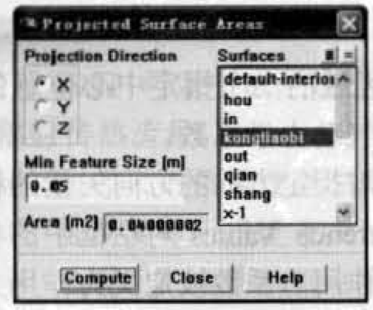


图10-29 Projected Surface Areas 对话框

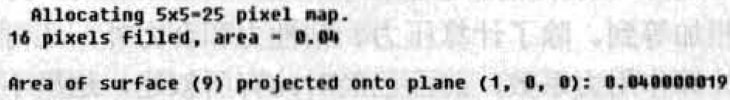


图10-30 投影面积报告

五、表面积分与体积分的计算

FLUENT 可以计算特定面上的场变量，如面积或质量流率、面积加权平均、质量加权平均、面平均、面最大值和最小值、顶点平均、顶点最大值和最小值等。面是数据点的集合，这些面可能是计算模型中创建的，也可能是用户在后处理过程中定义的。

由于面可以被任意放置在流场中，因此每个数据点处的变量都是由节点值线性内插值得到的。对于一些变量在网格节点上的值，可以由求解器直接计算得出，而另外一些变量在网格节点上的值，则通过对网格中心处的值取平均得到。

执行 Report→Surface Integrals...命令，弹出 Surface Integrals 对话框，Report Type 为所要得到的报告类型，Field Variable 下拉列表为要计算表面积分的场变量，Surfaces 为要选择的面，单击 Compute 按钮则在右下方 Box 和视图窗口中同时显示计算结果。【实例 5-2】进口的质量流率计算如图 10-31 所示。



图10-31 Surface Integrals 对话框

体积分计算与面积分计算方法相同，主要可以获得指定网格区域的体积或指定变量的体积积分、体积加权平均、质量加权积分、质量加权平均等。执行 Report→Volume Integrals...命令，可以打开如图 10-32 所示的 Volume Integrals 对话框，Report Type 为要选择计算的类型，Field Variable 下拉列表为要选择计算所需的积分类型，Cell Zones 为要计算的区域，单击 Compute 按钮则得到相应的计算值。图 10-32 即为【实例 5-2】的压力最大值计算。

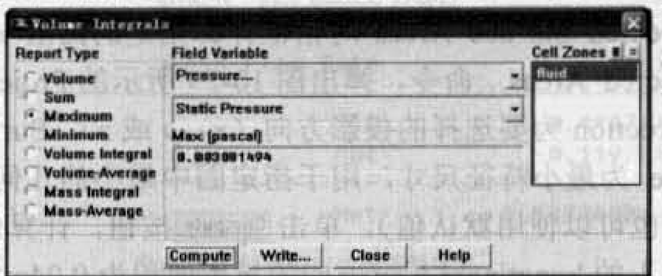


图10-32 Volume Integrals 对话框

【实例 10-1】：FLUENT 二维流动后处理实例——突扩管内流体流动

执行 File→Read→Case & Data...命令，读入 sl4-2.cas 和 sl4-2.dat 文件。

起始文件——参见附带光盘“Ch4\sl4-2.cas”、“Ch4\sl4-2.dat”。

动画演示——参见附带光盘“Ch10\AVI\sl10-1.avi”。

一、云图及等值线图

执行 Display→Contours...命令，弹出如图 10-33 所示的 Contours 对话框，选择 Contours of 下拉列表中的 Pressure...和 Static Pressure，勾选 Options 下方的 Filled，由于本例是二维问题，故不需要选择具体的面（Surfaces 列表不做选择），单击 Display 按钮，出现如图 10-34 所示的压强分布云图。

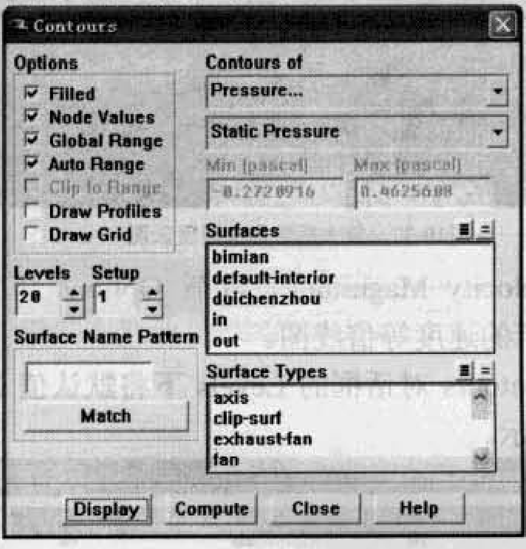


图10-33 Contours 对话框

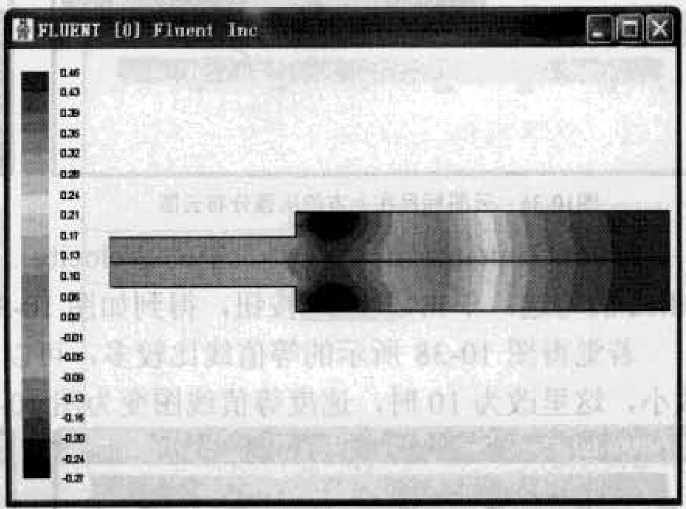


图10-34 压强分布云图

由于该问题的长宽比比较大，标尺在云图左方显示，占用了视图窗口左侧的位置，使得云图显得稍小一些。这时，读者可以执行 Display→Options...命令，弹出如图 10-35 所示的 Display Options 对话框，在对话框的右下角有个 Colormap Alignment 下拉列表，其中的 Left、Right、Top、Bottom 表示云图标尺所在的位置，我们选择 Top 后，单击 Apply 按钮。

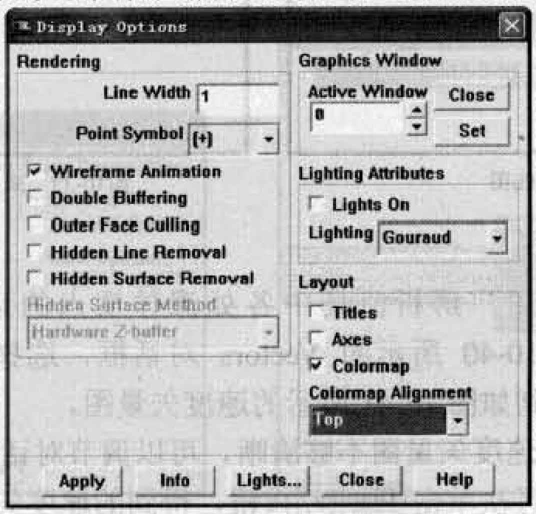


图10-35 Display Options 对话框

这时我们回到 Contours 对话框，再次单击 Display 按钮，出现如图 10-36 所示的压强分布云图。该云图比图 10-34 的云图稍大一些，可以使读者更清晰地辨析物理变量的变化。除了通过这种方式放大云图外，读者还可以通过鼠标控制来改变云图的大小和方向。若想放大，则按住中键向右下方框取云图中欲放大的区域，松开鼠标即完成了放大操作，如图 10-37 所示的放大云图。若想缩小，则按住中键向左上方框取云图中的部分区域，松开鼠标以完成缩小操作。对于二维问题，还可以按住鼠标左键拖动云图在不同位置显示。

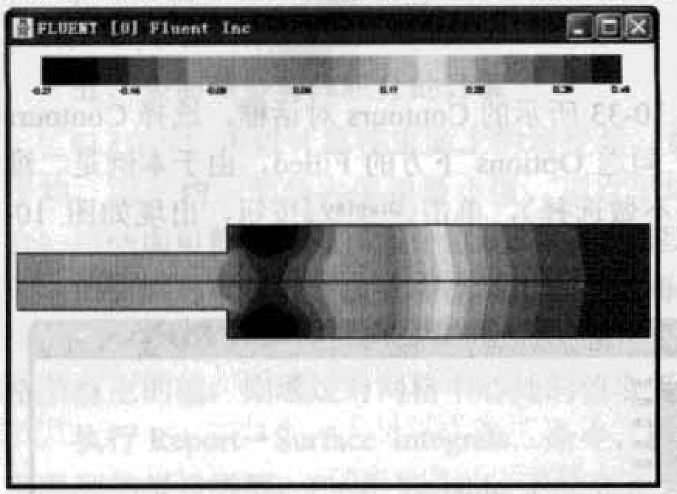


图10-36 云图标尺在上方的压强分布云图

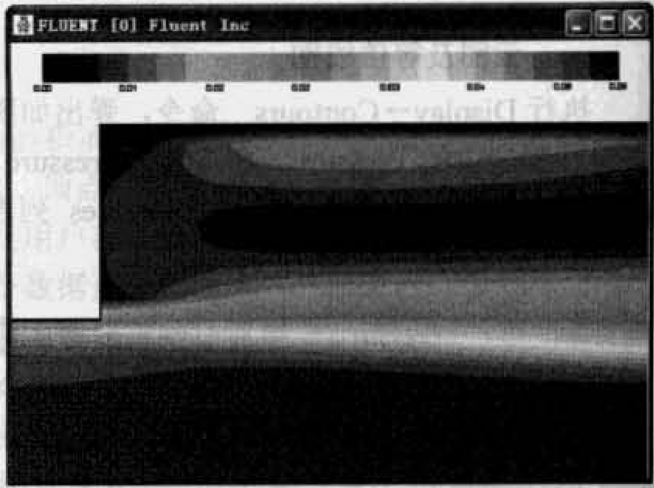


图10-37 放大后的局部速度云图

选择 Contours of 下拉列表中的 Velocity…和 Velocity Magnitude，取消 Options 下方 Filled 的勾选，单击 Display 按钮，得到如图 10-38 所示的速度等值线图。

若觉得图 10-38 所示的等值线比较多，可以在 Contours 对话框的 Levels 下将默认值 20 改小，这里改为 10 时，速度等值线图变为图 10-39 所示。

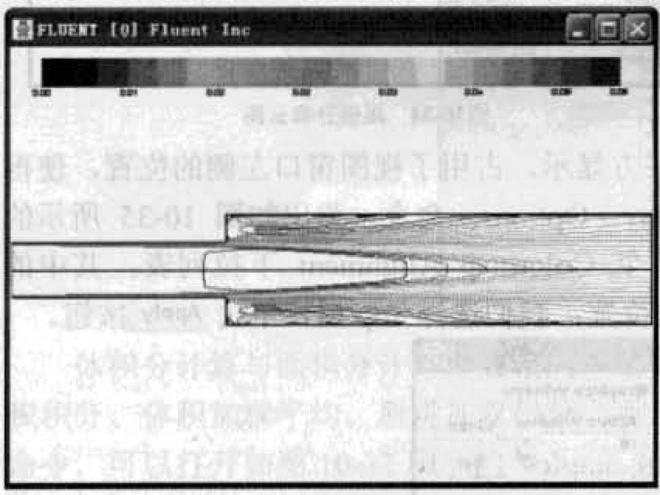


图10-38 速度等值线图

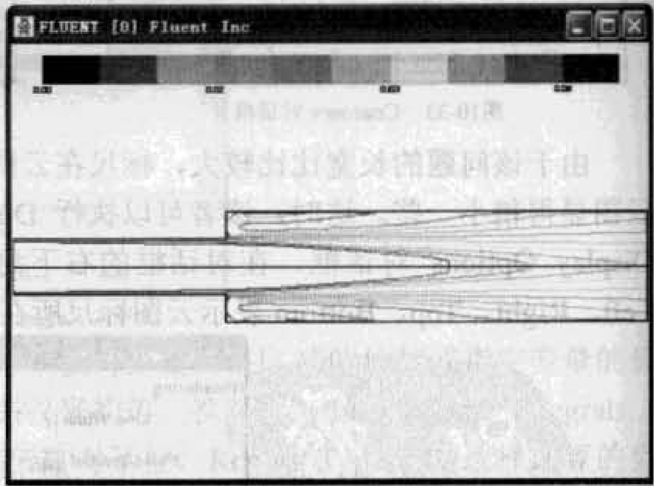


图10-39 减少等值线后的速度等值线图

二、速度矢量图

速度矢量图可以帮助用户辨析流场中各处流体质点的运动趋势，执行 Display→Vectors…命令，弹出如图 10-40 所示的 Vectors 对话框，选择 Vectors of 下拉列表中的 Velocity，单击 Display，得到如图 10-41 所示的速度矢量图。

若觉得图 10-41 所示的速度矢量图不够清晰，可以调节对话框中的 Scale 和 Skip，这里将 Scale 和 Skip 都改为 5，再次单击 Display 按钮，得到的速度矢量图如图 10-42 所示。

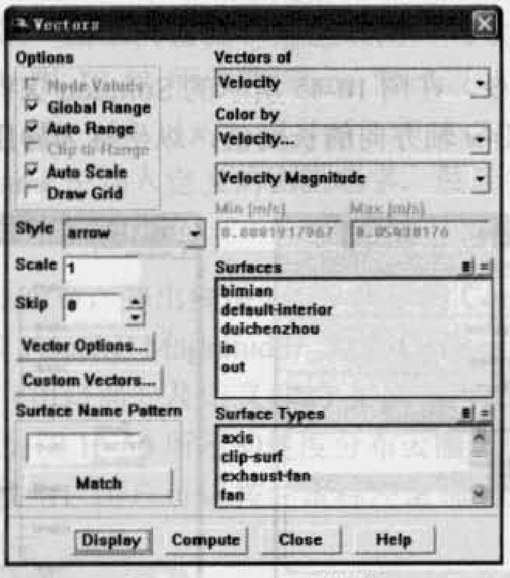


图10-40　Vectors 对话框

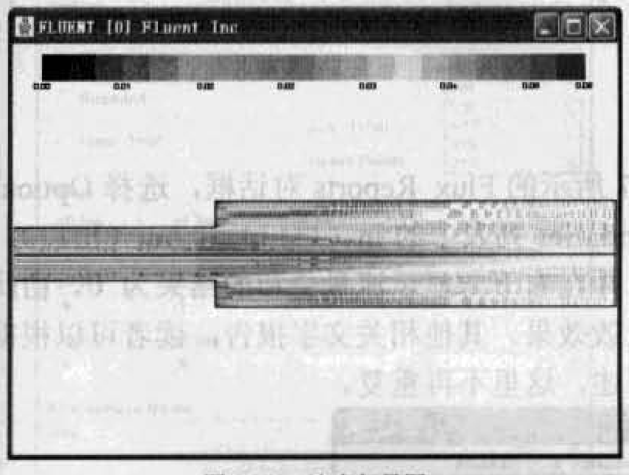


图10-41　速度矢量图

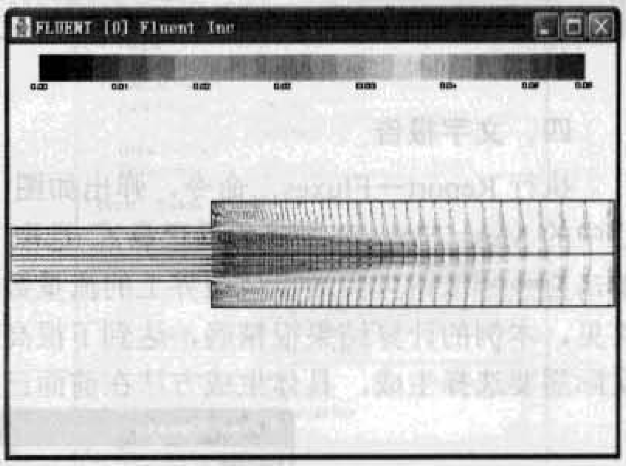


图10-42　放大箭头尺寸和扩大间距后的速度矢量图

我们还可以将速度矢量图与等值线图重叠显示在一个视图窗口中，此时需要执行 Display→Scene...命令，在图 10-43 所示 Scene Description 对话框的 Scene Composition 栏勾选 Overlays，单击 Apply 按钮启动图形的重叠显示。

分别在 Contours 和 Vectors 对话框中完成速度等值线和速度矢量图的显示操作，得到如图 10-44 所示的重叠图。

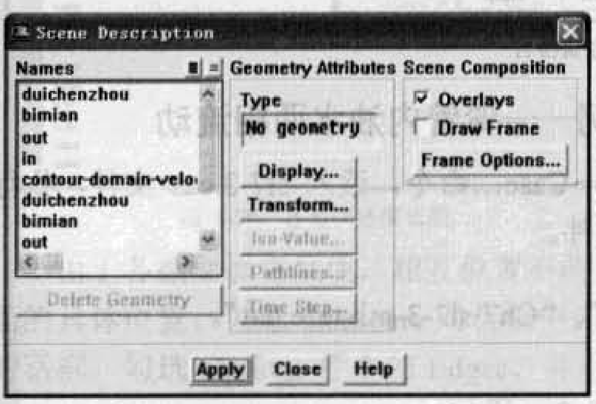


图10-43　Scene Description 对话框

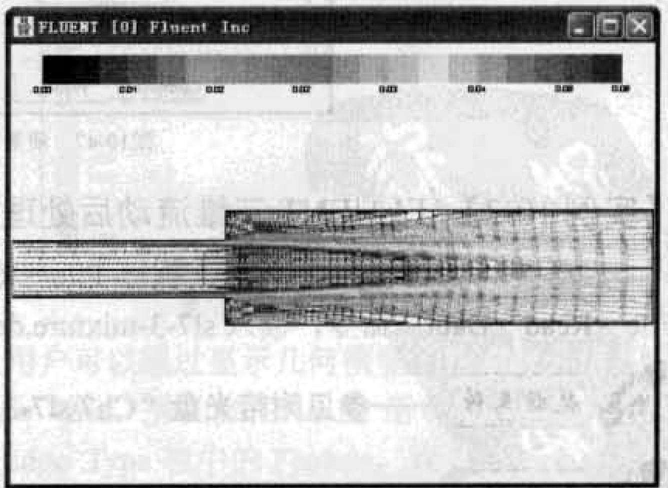


图10-44　速度等值线与矢量图的重叠

三、XY曲线图

执行Plot→XY Plot...命令，在图10-45所示的Solution XY Plot对话框中进行相应的显示设置。这里选择横坐标为沿 x 轴方向的长度值，纵坐标为静压强，显示对称轴上的压强曲线，如图10-46所示。

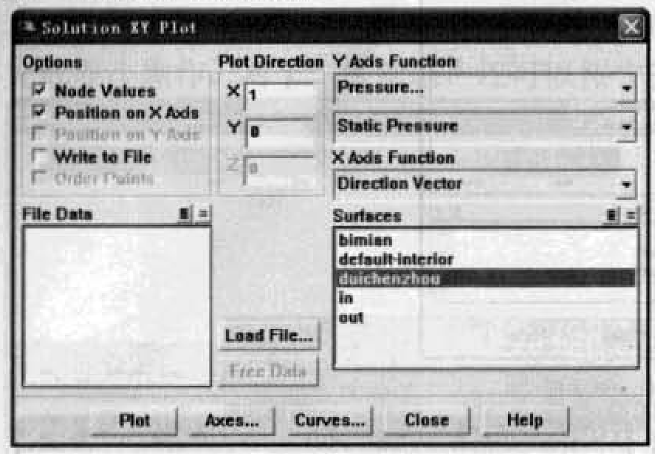


图10-45　Solution XY Plot对话框

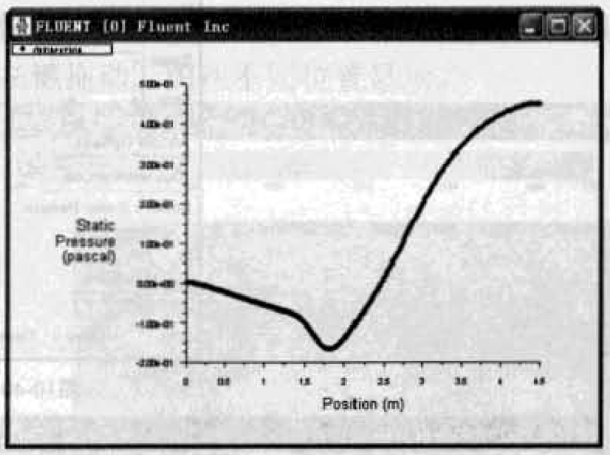


图10-46　压强在对称轴上的分布情况

四、文字报告

执行Report→Fluxes...命令，弹出如图10-47所示的Flux Reports对话框，选择Options栏中的Mass Flow Rate（质量流量），选取Boundaries列表中的in（进口）和out（出口）。单击Compute按钮可得进出口边界上的流量数值，并在右下方显示流量总和的结果为0。由此可见，本例的计算结果很精确，达到了很高的收敛效果。其他相关文字报告，读者可以根据实际需要选择生成，具体生成方法在前面已有阐述，这里不再重复。

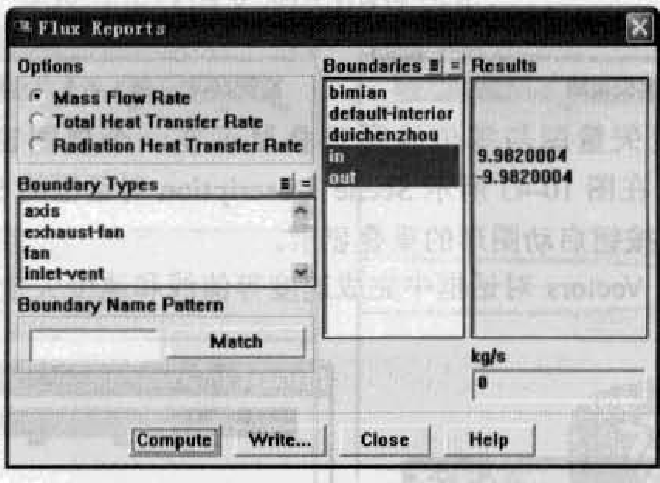


图10-47　质量流量通量报告

【实例10-2】：FLUENT三维流动后处理实例——弯管内油水两相流动

启动FLUENT三维解算器，执行File→Read→Case...命令，读入sl7-3.cas文件，执行File→Read→Data...命令，读入sl7-3-mixture.dat文件。

起始文件——参见附带光盘“Ch7\sl7-3.cas”、“Ch7\sl7-3-mixture.dat”。

动画演示——参见附带光盘“Ch10\AVI\sl10-2.avi”。

对于三维问题，要显示某一面上的云图、等值线图、矢量图等，需要先定义面。执行Surface→Plane...命令，弹出如图 10-48 所示的 Plane Surface 对话框，三点确定一个面，用户需要在 Points 下方的（x0，y0，z0）、（x1，y1，z1）和（x2，y2，z2）中输入三点对应的坐标，然后在 New Surface Name 中输入定义的面的名字，最后单击 Create 按钮生成该面。

一、云图及等值线图

执行 Display→Contours...命令，弹出如图 10-49 所示的 Contours 对话框，选择 Contours of 下拉列表中的 Velocity...和 Velocity Magnitude，勾选 Options 栏中的 Filled，选择 Surfaces 列表中的 in（进口面）、out（出口面）及定义好的 x-p、x=-2.5、x=0、y=0、y=2.5 五个截面，单击 Display 按钮，出现如图 10-50 所示的速度分布云图。

此时的速度云图垂直于视角，用户可以按住鼠标左键拖动来调节视角，如图 10-51 所示。



图10-48　Plane Surface 对话框

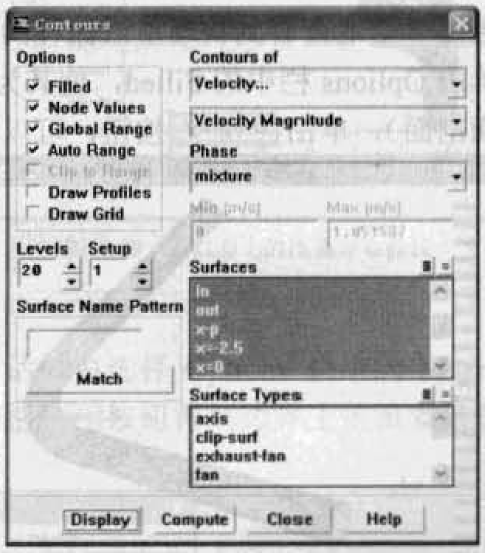


图10-49　Contours 对话框

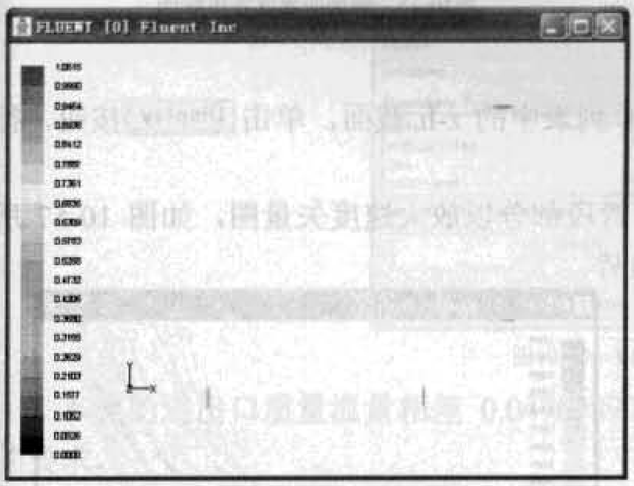


图10-50　各截面速度云图



图10-51　视角调节后的云图显示

由于各截面孤立呈现，相互位置不清楚，用户可以通过显示几何模型的轮廓来分清各截面的具体位置。勾选 Contours 对话框中的 Draw Grid，弹出如图 10-52 所示的 Grid Display 对话框。勾选 Options 栏中的 Edges，并选择 Edge Type 栏中的 Feature，设置 Shrink Factor 为 0，Feature Angle 为 8，单击 Display 按钮，得到的轮廓如图 10-53 所示。



图10-52 Grid Display 对话框



图10-53 弯管轮廓显示

轮廓显示后，回到 Contours 对话框，再次单击 Display 按钮，可以看到有轮廓显示的各截面速度云图，如图 10-54 所示。该云图的显示，可以帮助用户清晰地辨别各截面的具体位置，也能清楚地查看到物理量沿流程的变化趋势。

单击 Options 栏中的 Filled，使其为非选中状态，选择 Surfaces 列表中已定义好的 z-h 截面（横剖面），单击 Display 按钮，可以得到如图 10-55 所示的速度等值线图。



图10-54 有轮廓显示的速度云图

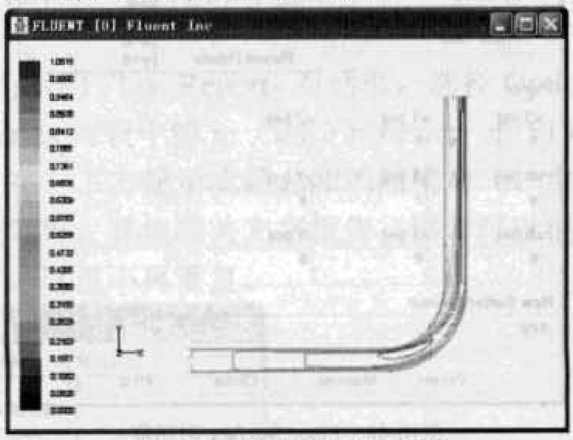


图10-55 横剖面速度等值线图

二、速度矢量图

执行 Display→Vectors...命令，选取 Surfaces 列表中的 z-h 截面，单击 Display 按钮，得到的矢量图如图 10-56 所示。

改变 Scale 为 3，Skip 为 5，并左键框取弯管段部分以放大速度矢量图，如图 10-57 所示，用户可以清晰地看到该处流体质点的运动趋势。

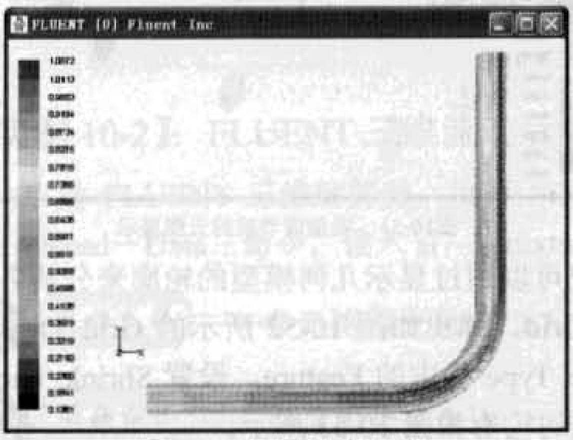


图10-56 横剖面速度矢量图

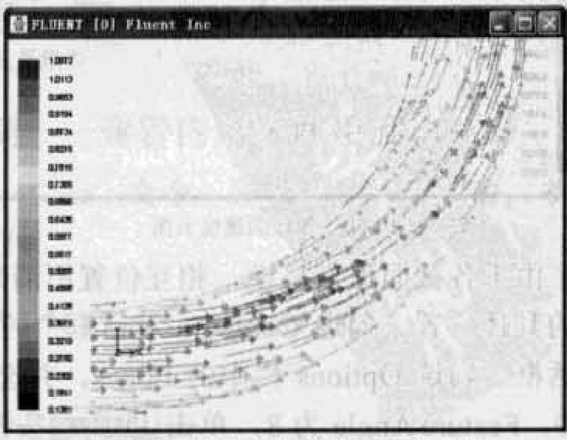


图10-57 放大后的弯管段速度矢量图

三、XY 曲线图

执行 Plot→XY Plot...命令，在图 10-58 所示的 Solution XY Plot 对话框中进行相应的显示设置。

这里选择 Options 栏中的 Node Values 和 Position on X Axis，设置 Plot Direction 的 X 为 1，其余为零，选择 Y Axis Function 列表中的 Pressure...和 Static Pressure，并选取 Surfaces 列表中的 z-h 截面，单击 Plot 按钮得到横剖面上的压强曲线，如图 10-59 所示。

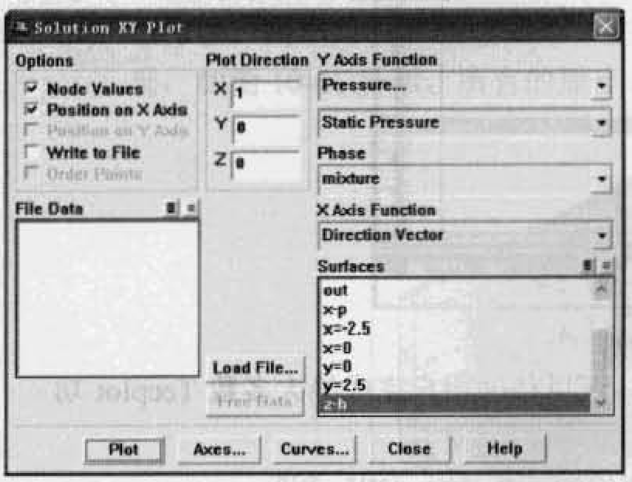


图10-58　Solution XY Plot 对话框

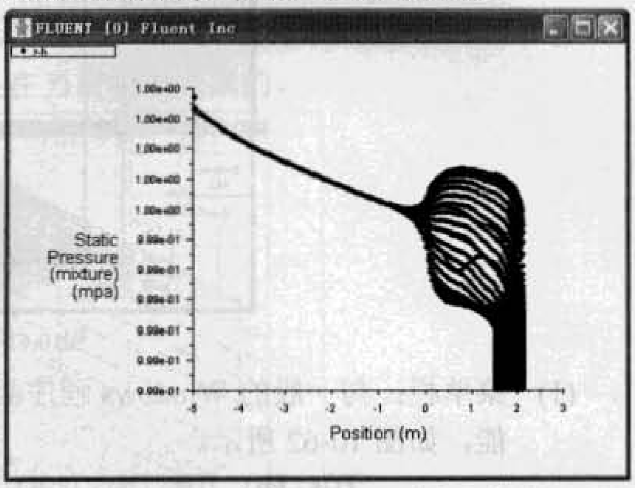


图10-59　横剖面上的压强分布曲线

四、文字报告

执行 Report→Fluxes...命令，在 Flux Reports 对话框中选择 Options 栏中的 Mass Flow Rate，同样选取 Boundaries 列表中的 in 和 out。单击 Compute 按钮得到边界上的流量数值，如图 10-60 所示。

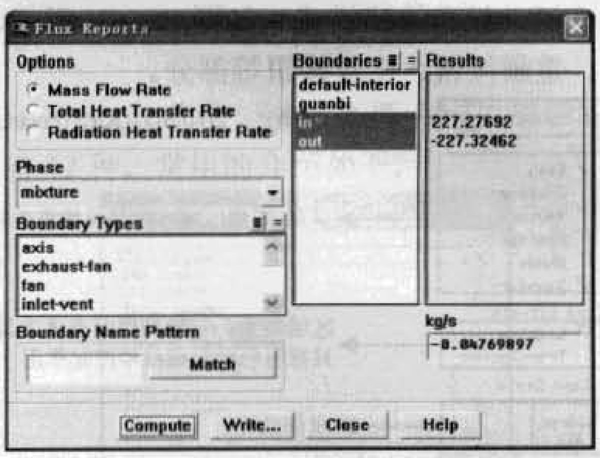


图10-60　Flux Reports 对话框

本例的进出口质量流量相差 0.04769897kg/s，相比上例稍差一些，但也达到了收敛精度的要求。

10.2　Tecplot 后处理

Tecplot 是一款功能强大的科学绘图软件，提供了多种图形格式，有针对 FLUENT 软件的专用数据接口，可以直接读入算例文件和数据文件，也可以在 FLUENT 软件中选择面和变量，然后输出 Tecplot 格式的文档再导入到 Tecplot 中进行处理。

10.2.1 Tecplot 界面

Tecplot 界面友好，分为菜单栏、工具栏、状态栏和工作区 4 部分，如图 10-61 所示。

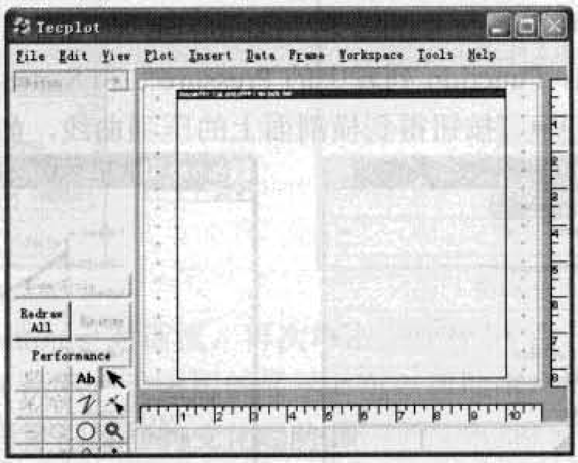


图10-61 Tecplot 界面

(1) 菜单栏：与一般的 Windows 程序类似，可以帮助用户完成绝大多数 Tecplot 功能，如图 10-62 所示。

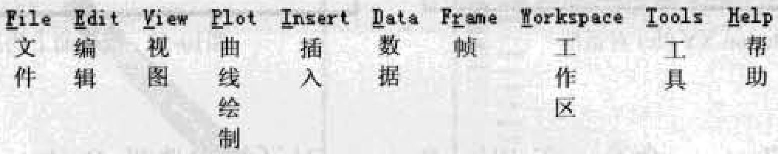


图10-62 菜单栏

(2) 工具栏：包含了常用的画图控制按钮，可以进行常用的画图控制，另外还可以控制帧的模式、活动帧和快照模式。如图 10-63 所示，包括帧模式、区域/图层、区域效果、重画按钮、工具按钮等部分。

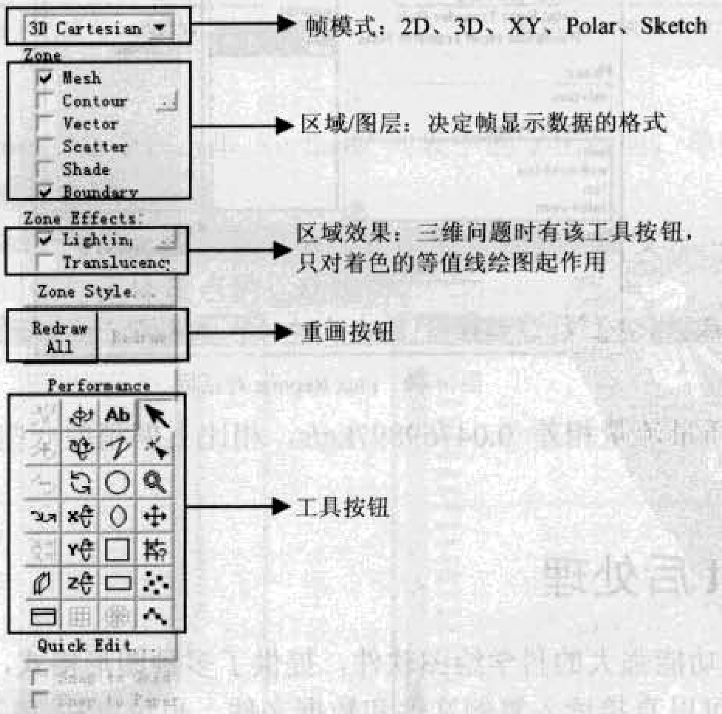


图10-63 工具栏

(3) 状态栏：位于窗口底部，在鼠标指针移动过工具栏时会给出帮助提示，如图 10-64 所示。状态栏可以利用 File→Preference 命令进行设定，包括颜色、大小等，如图 10-65 所示。

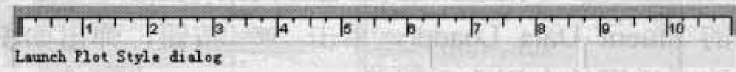


图10-64 状态栏



图10-65 Preference 列表

(4) 工作区：用于绘制和创建图形，在默认的情况下，Tecplot 同时显示网格和标尺，如图 10-66 所示，所有的操作都是在当前帧中完成的。

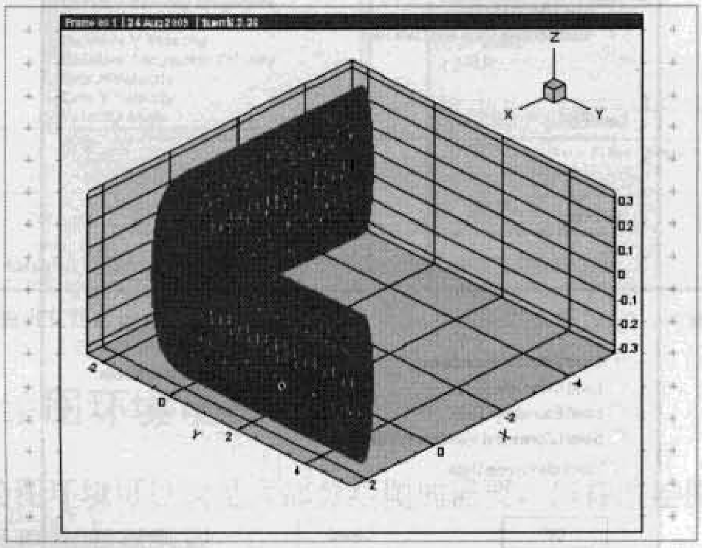


图10-66 工作区

10.2.2 Tecplot 读取 FLUENT 文件数据

在 Tecplot 中执行 File→Import 命令，弹出如图 10-67 所示的数据加载对话框，提供了可供选择的数据类型，共有 12 种，常用的介绍如下。

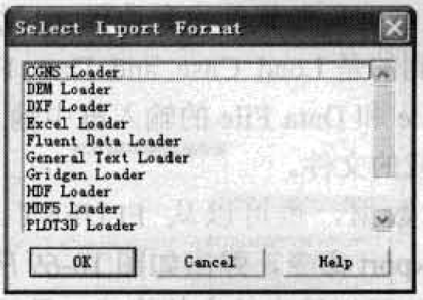


图10-67 数据加载对话框

- CGNS 格式，计算流体力学通用注释系统格式。
- DEM 格式，数字评价图格式。
- DXF 格式，数字交换格式。
- Excel 表格式。
- FLUENT 格式。
- Gridgen 格式。
- HDF 格式，层级数据格式。

- Image 文件格式，映像文件格式。
- PLOT3D 文件格式。
- Text spreadsheet 格式，文字表单格式。

这里我们只讲解读取 FLUENT 文件数据的过程，其余的可以查看专门的 Tecplot 书籍。

选择 Select Import Format 对话框中的 Fluent Data Loader，单击 OK 按钮，弹出如图 10-68 所示的 Fluent Data Loader 对话框，该对话框的上侧选项如下。

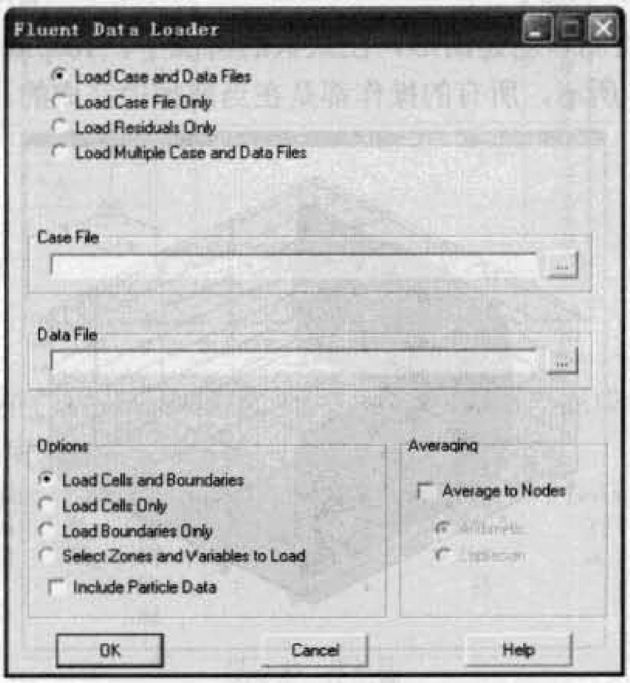


图10-68 Fluent Data Loader 对话框

- Load Case and Data Files: 加载工程和数据文件。
- Load Case File Only: 只加载工程文件。
- Load Residuals Only: 只加载残差数据。
- Load Multiple Case and Data Files: 加载多个工程和数据文件。

Options 栏提供了辅助选项，有只加载单元和边界，只加载单元，只加载边界之分。在导入 FLUENT 数据时，通常用到的是 Load Case and Data Files，Options 则选为 Load Cells and Boundaries，然后在 Case File 和 Data File 的输入框中输入加载文件的详细路径，或者单击 ... 按钮，从硬盘上选择要加载的文件。

对于某些需要特殊分析的数据，也可以从 FLUENT 中先导出为 Tecplot 数据。在 FLUENT 界面中，执行 File→Export 命令，弹出如图 10-69 所示的输出文件对话框。

对话框最左侧 File Type 中为可以输出的文件格式，最下端即为 Tecplot 数据格式，除此之外，还支持 ABAQUS、ANSYS Input、ASCII、AVS、NASTRAN、PATRAN 等常用软件的数据格式。对话框中间的 Surfaces 列表为欲输出数据的面。对话框右侧的 Functions to Write 列表为要输出的变量，包括常用的 Pressure、Density、Velocity Magnitude、Stream Function 等。选择好相应的面及变量后，单击 Write... 按钮，即可把对应数据输出为 Tecplot 格式的文件。

在 FLUENT 中完成文件输出之后，可在 Tecplot 中通过 File→Load Data File(s)命令，读取刚输出的数据文件来进行处理，如图 10-70 所示，选择 v_tec，单击 打开(O) 按钮即将

Tecplot 格式的数据导入了 Tecplot 软件。

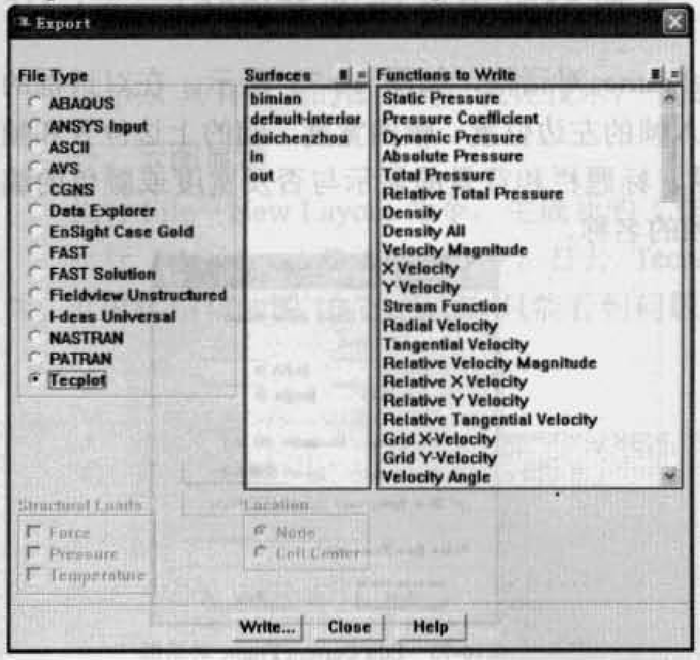


图10-69 输出文件对话框



图10-70 加载数据文件对话框

10.2.3 Tecplot 绘图环境设置

系统缺省设置的绘图环境可以满足大部分绘图的需要，但修改绘图环境可以提供更多的选择，使所绘制的图形更加丰富多彩。

一、帧的创建和编辑

在默认设置中，工作区仅有一个绘图帧，用户可以单击工具栏中的▭按钮，或者执行 Frame→Create New Frame 命令，此时光标变成“十字线”形状，用户只需在工作区中按住鼠标左键并拖动即可以创建出一个新的绘图帧，如图 10-71 所示。

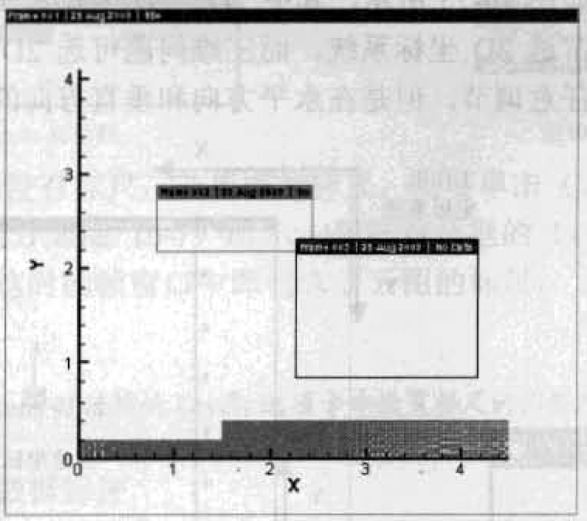


图10-71 新帧的创建

创建帧后，可以对其进行移动、删除、改变尺寸等操作。首先用鼠标单击帧的标题栏，选中帧时帧的边界会出现八个黑色方块，移动光标到边界上，光标形状变成十字箭头，按住鼠标左键并拖动即可实现移动操作，如图 10-72 所示。若移动光标到黑色方块上，光标变成

双向箭头，按住鼠标左键并拖动可以调整帧的大小。另外，在选中帧的状态下，按键盘上的Delete键，可以删除当前帧。

双击帧的标题栏可以打开 Edit Current Frame 对话框，如图 10-73 所示。在对话框的Left、Width、Top Side 和 Height 中可以输入帧的左边位置、帧的宽度、帧的上边位置和帧的高度。对话框中部的三行分别对应了边界、标题栏和背景的显示与否及宽度或颜色的编辑。对话框下部的 Frame Name 中可以输入帧的名称。

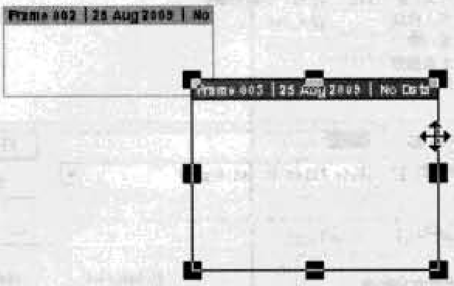


图10-72 移动帧

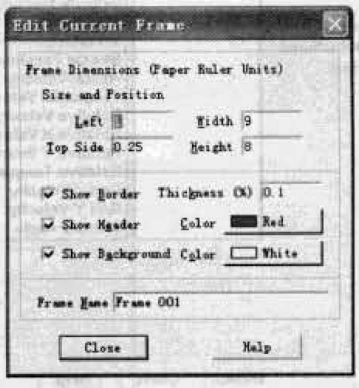


图10-73 Edit Current Frame 对话框

二、网格与标尺的设定

网格可以方便地定位对象，在添加文本和几何图形时可以选择对齐到网格。标尺可以方便地放大或缩小对象。标尺的显示单位可以选择为厘米（cm）、英寸（in）、点数（pt）或者不显示标尺。要进行网格与标尺的设定，需要执行 Workspace→Ruler/Grid 命令，打开如图 10-74 所示的 Ruler/Grid 对话框，Show Grid 为显示网格，Grid Spacing 为网格间距，Show Ruler 为显示标尺，Ruler 为标尺的间距。用户可根据实际需要，进行相关设置。

三、坐标系统

Teplot 提供了多个坐标系统，其中工作纸、帧、2D 和 3D 坐标系统最为重要。4 种坐标系的相互关系及原点位置如图 10-75 所示，其中 2D、3D 坐标系统是根据数据集合进行绘制的坐标系统，二维问题通常选 2D 坐标系统，而三维问题可选 2D 也可选 3D 坐标系统。帧的坐标系的长宽比例可以任意调节，但是在水平方向和垂直方向的取值范围为 0 到 100。

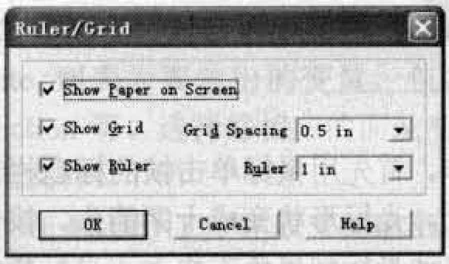


图10-74 Ruler/Grid 对话框

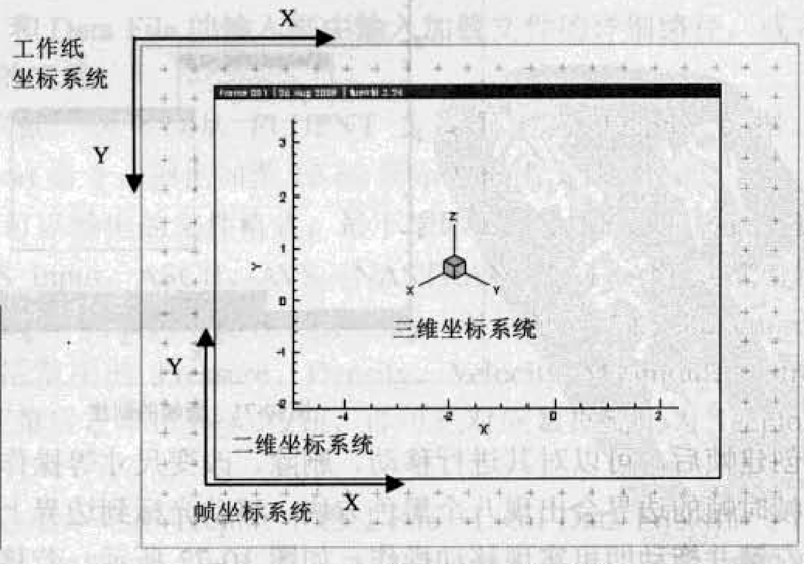


图10-75 Tecplot 坐标系统

10.2.4 Tecplot 图形及可视化技术

Tecplot 具有强大的图形及可视化技术，下面我们对其进行详细介绍。

一、云图显示

执行 File→New Layout 命令，生成新的工作文件。

执行 File→Load Datafile 命令，打开 Tecplot 安装目录下的“Demo\2D\velocity.plt”文件。此时帧窗口如图 10-76 所示，只能看到问题的网格。

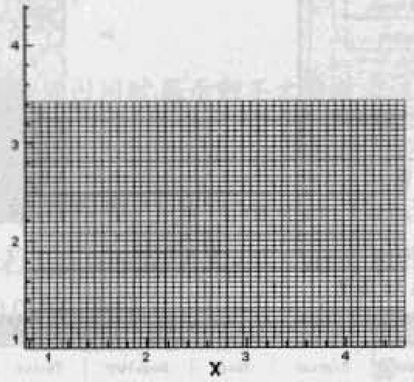


图10-76 网格显示

在工具栏中取消选中 Mesh 复选框，而选中 Contour 复选框，会弹出如图 10-77 所示的对话框，选择 R/RFR，即可显示出该问题的云图，如图 10-78 所示。

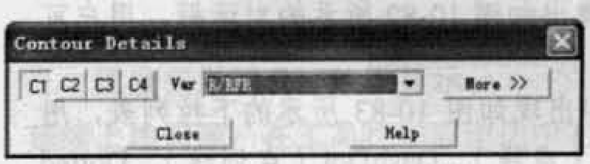


图10-77 Contour Details 对话框

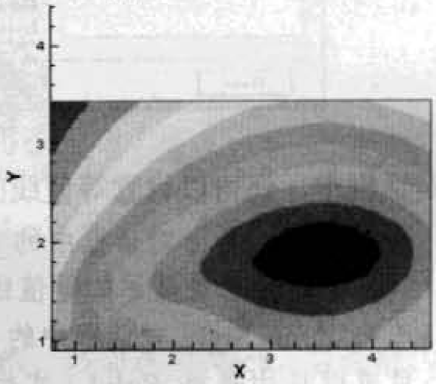


图10-78 云图显示

图 10-78 所示的云图没有标尺，若想添加标尺，需要单击 Contour Details 对话框中的 More >> 按钮，使对话框展开如图 10-79 所示，选择对话框的 Legend 选项卡，并在 Show Contour legend 前打勾。这时的帧窗口中即包含了云图的标尺，方便用户读数，如图 10-80 所示。

注意：用户可以在 Contour Details 对话框的 Levels 选项卡中设置标尺的间距及密度，默认为 10 个刻度。

二、等值线图显示及数据标注

等值线图是在云图之上建立的，在上述云图之上，单击工具栏中的 Zone Style... 按钮，弹出如图 10-81 所示的 Zone Style 对话框。单击对话框中的 Contour Type 按钮，会弹出包含 Lines、Flood、Both Lines & Flood、Average Cell Flood 和 Primary Value Flood 的下拉列表，这里选择 Both Lines & Flood，即同时显示等值线与云图。

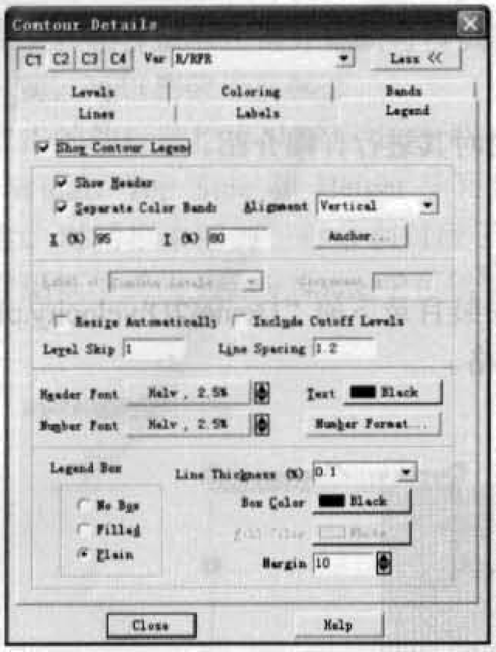


图10-79 展开的 Contour Details 对话框

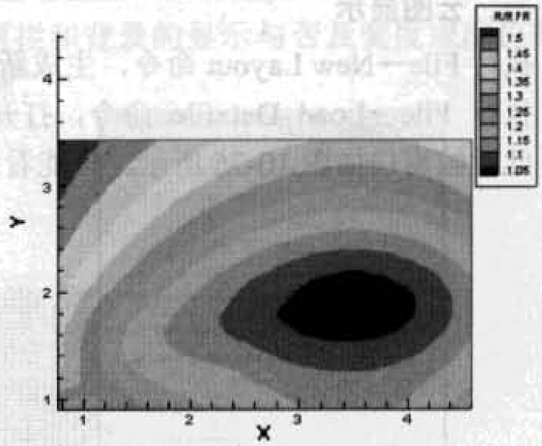


图10-80 带标尺的云图

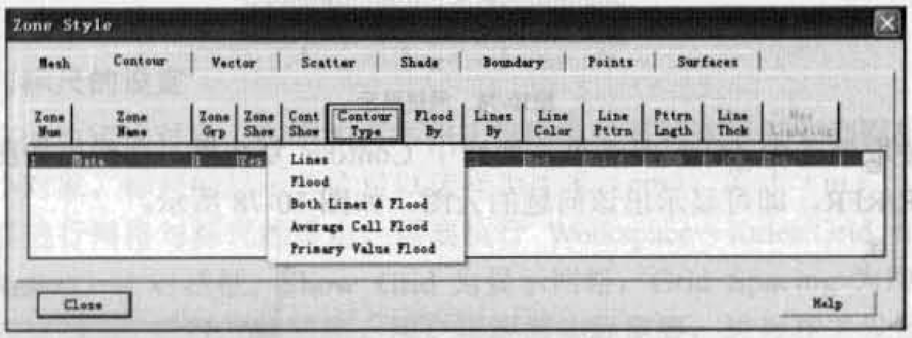


图10-81 Zone Style 对话框

在对话框中，还可以设置等值线的线型、颜色和宽度等参数，以达到最佳的显示效果。

- 单击 Zone Style 对话框中的 Line Color 按钮，弹出如图 10-82 所示的对话框，用户可以从中选择想要显示的等值线颜色。
- 单击 Zone Style 对话框中的 Line Pttrn 按钮，即出现如图 10-83 所示的下拉列表，用户可以从中选择 Solid（实线）、Dashed（虚线）、DashDot（点划线）、Dotted（点线）、LongDash（长虚线）和 DashDotDot（点划点线）等类型。

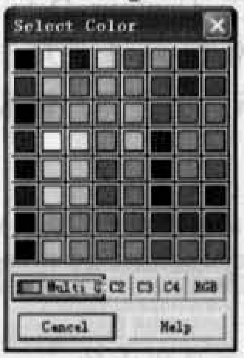


图10-82 色彩选择

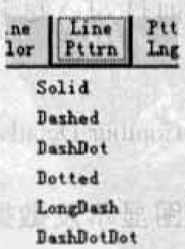


图10-83 线型选择

- 单击 Zone Style 对话框中的 Line Thck 按钮，即出现如图 10-84 所示的下拉列表，其中含有 0.02、0.1、0.4、0.8 和 1.5 等线宽。此时的等值线图如图 10-85 所示。

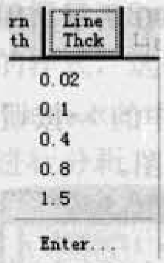


图10-84 线宽选择

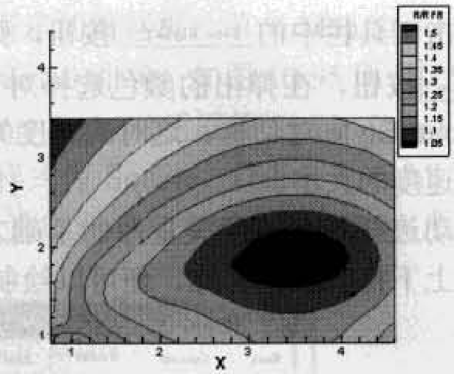


图10-85 等值线图

注意：在云图色彩变化较大时，等值线与云图同时显示则不太清楚，这时可以选择 Lines 只显示等值轮廓线。

若想在等值线上加注数据，用户需要打开 Contour Details 对话框，选择 Labels 选项卡，并在 Show Labels 前打勾。若显示的数字太小，还可以调节 Font 到合适数值来放大字体，加注数据后的等值线图如图 10-86 所示。

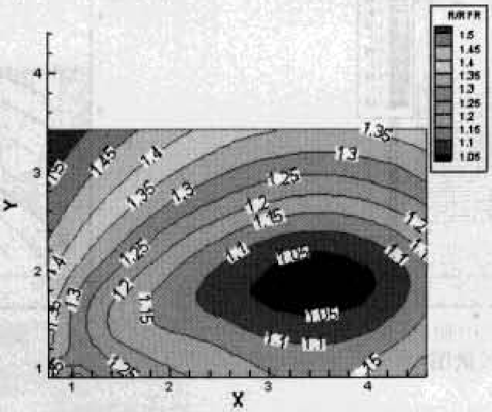


图10-86 加注数据的等值线图

三、速度矢量图及迹线图显示

延续上述问题，在工具栏中取消选中 Contour 复选框，转而选中 Vector 复选框，此时会弹出如图 10-87 所示的 Select Variables 对话框，保持 U 为 U/RFC，V 为 V/RFC 的默认设置，单击 OK 按钮。

此时，帧窗口中的速度矢量图如图 10-88 所示，Tecplot 默认的颜色为红色，不能反映速度的大小，所以应对其进行着色。

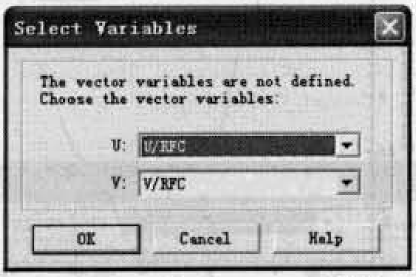


图10-87 Select Variables 对话框

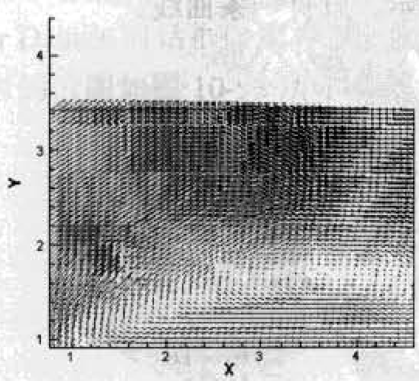


图10-88 默认颜色的速度矢量图

单击工具栏中的 Zone Style... 按钮，弹出如图 10-89 所示的 Zone Style 对话框，单击对话框中的 Line Color 按钮，在弹出的颜色选择对话框中选择多色（Multi），然后单击 Close 按钮关闭 Zone Style 对话框。这时的速度矢量已经被着色，如图 10-90 所示，用户可以清晰地辨别各点速度的大小。

流动迹线是在速度矢量图的基础之上绘制的。单击工具栏中的按钮，然后在速度矢量图上上下拖动鼠标光标，便可以绘制出如图 10-91 所示的迹线图。

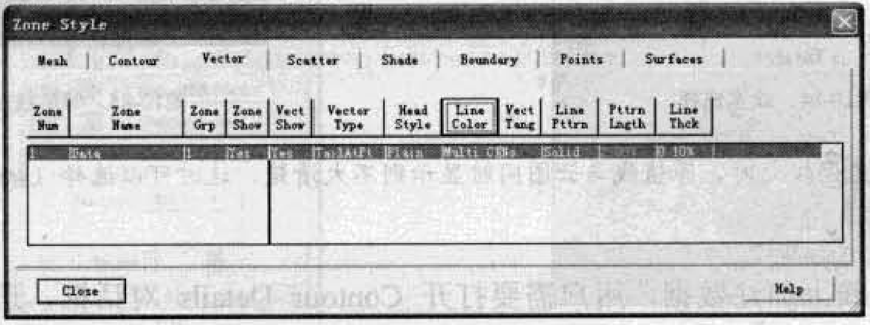


图10-89　Zone Style 对话框

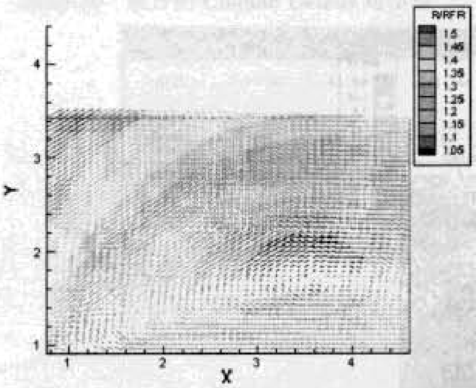


图10-90　着色后的速度矢量图

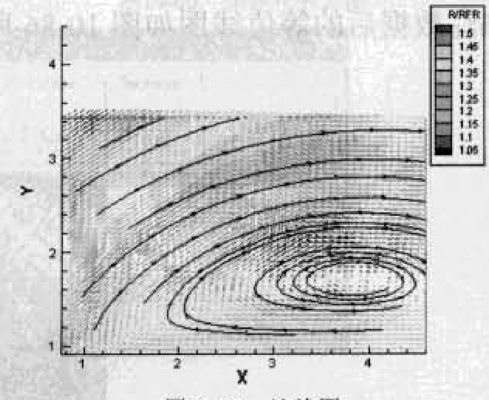


图10-91　迹线图

注意：当速度矢量图较密时，上下拖动鼠标有时会生成很密的迹线图，这时可采取单击若干个矢量来生成较疏的迹线。

四、XY 曲线图显示

执行 File→New Layout 命令，生成新的工作文件。执行 File→Load Datafile 命令，打开 Tecplot 安装目录下的“Demo\XY\rainfall.plt”文件。在工具栏的帧模式中选择 XY Line，其图层格式有直线式、符号式、柱状式等，如图 10-92 所示。此时帧窗口中的 XY 曲线如图 10-93 所示，只有一条曲线。

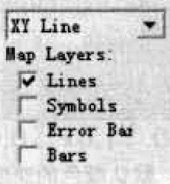


图10-92　XY Line 帧模式

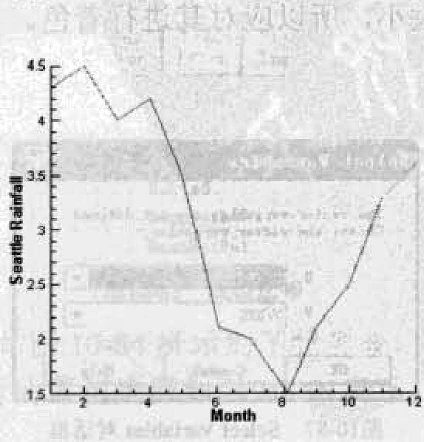


图10-93　XY 曲线

单击工具栏中的Mapping Style...按钮，弹出如图 10-94 所示的对话框，单击 Map Show 选择下拉列表中的 Activate 以激活 Dallas Rainfall 和 Miami Rainfall 曲线，如图 10-95 所示。

若选中图层的符号（Symbols）显示，可在 Mapping Style 对话框的 Symb Shape 中选择不同曲线点符号的样式，选择 Seattle Rainfall 曲线点样式为 Square，Dallas Rainfall 曲线点样式为 Delta，Miami Rainfall 曲线点样式为 Circle，曲线图即可变成如图 10-96 所示的形式，以方便用户进行分析。

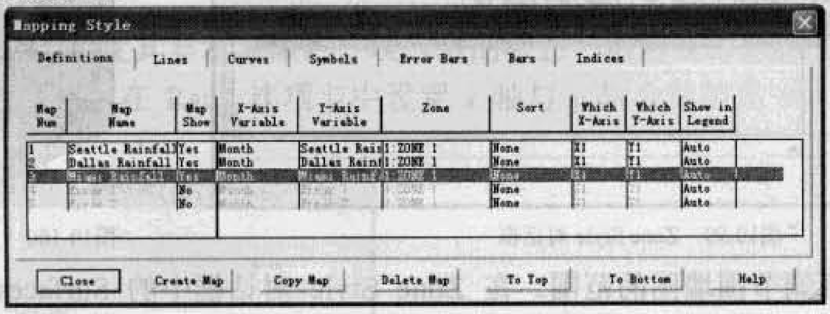


图10-94　Mapping Style 对话框

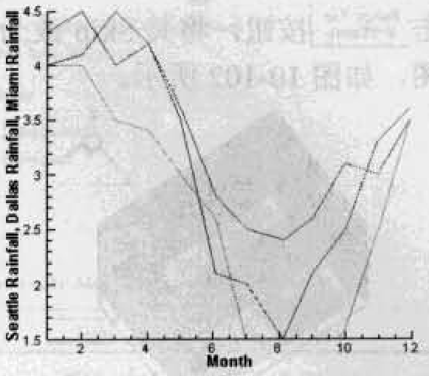


图10-95　三条 XY 曲线

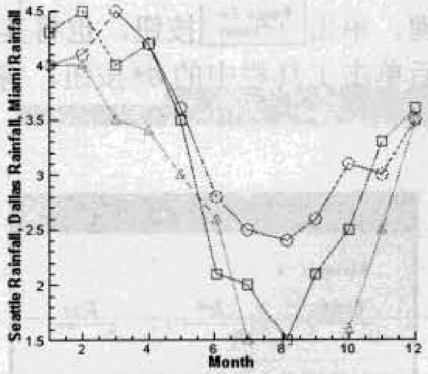


图10-96　带有点样式的曲线图

五、三维流场图显示

三维问题的云图、等值线图、矢量图的处理方法与二维一样。针对三维数据，Tecplot 还有特殊的绘图格式——围墙图，其形状类似于用围墙将平面分割成许多小格子。

围墙面的数据可以是 IJ 有序数据，也可以是 I，J，K 平面和 IJK 数据。围墙面的特别之处在于要绘制出底面数据，然后绘制出垂直于底面的数据作为围墙，并把面分割成小格子。下面我们介绍围墙图的绘制。

执行 File→New Layout 命令，生成新的工作文件。执行 File→Load Datafile 命令，打开 Tecplot 安装目录下的“Demo\3D_Volume\fluid.plt”文件。取消选中工具栏中的 Mesh 复选框，而选中 Contour 复选框，在图 10-97 所示的 Contour Details 对话框中选择 Var 为 E。

单击Close按钮，关闭 Contour Details 对话框，此时的云图如图 10-98 所示。



图10-97　Contour Details 对话框

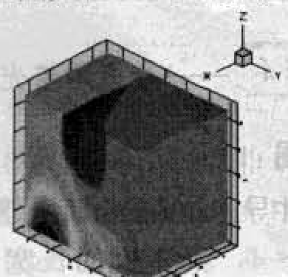


图10-98　三维云图

下面进行围墙图的具体绘制。单击 Zone Style... 按钮，在图 10-99 所示的 Zone Style 对话框中选择 Surfaces 选项卡，然后单击 Surfaces To Plot 按钮，在下拉列表中选中 I-J-K-planes，此时可以看到只有 x 方向有了围墙面，如图 10-100 所示。

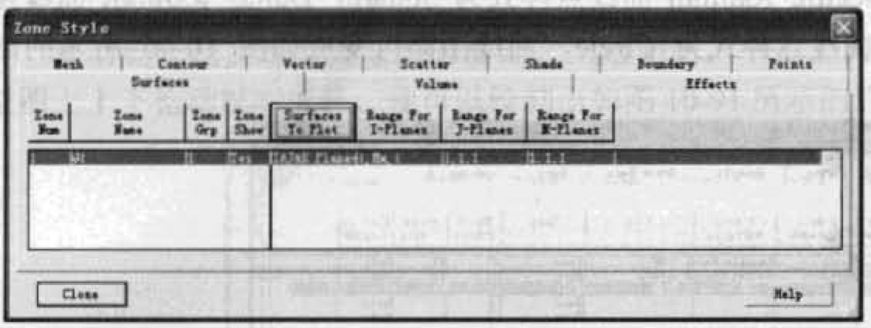


图10-99 Zone Style 对话框

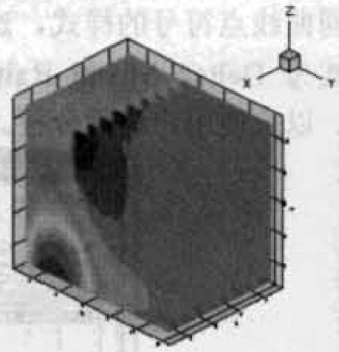


图10-100 只有 x 方向的围墙面

接着我们需要调节围墙图的范围。在 Zone Style 对话框中的 Surfaces 选项卡中，单击 Range For I-Planes 按钮，弹出如图 10-101 所示的 Enter Range 对话框，改变 Skip 为 5，单击 OK 按钮。同理，单击 Range For J-Planes 按钮，也将其 Skip 改为 5。单击 Range For K-Planes 按钮，将其 Skip 改为 Mx。

最后单击工具栏中的按钮，将图形调至合适视图，如图 10-102 所示。

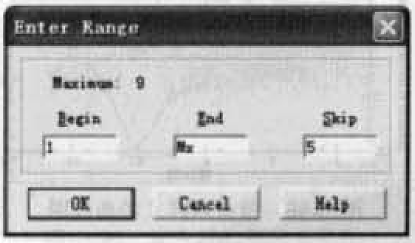


图10-101 范围设定对话框

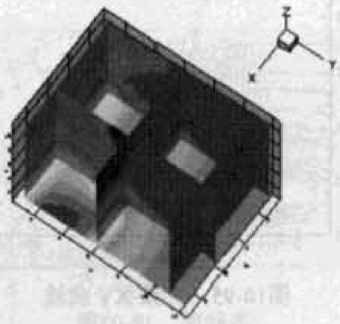


图10-102 围墙图效果

注意：用户可根据实际需要调整 Rang for I-Planes、J-Planes、K-Planes 中的 Begin、End 和 Skip。

【实例 10-3】：Tecplot 二维流动后处理实例——突扩管内流体流动

执行 File→Import 命令，选择 Select Import Format 中的 Fluent Data Loader，单击 OK 按钮。在弹出的对话框中选择 Load Case and Data Files，然后单击 Case File 和 Data File 输入框右侧的 ... 按钮，从硬盘上选择要加载的文件“sl4-2.cas”和“sl4-2.dat”，单击 OK 按钮。

起始文件——参见附带光盘“Ch4\sl4-2.cas”、“Ch4\sl4-2.dat”。

动画演示——参见附带光盘“Ch10\AVI\sl10-3.avi”。

一、云图

数据文件导入 Tecplot 后，默认只显示网格及边界，如图 10-103 所示。图中 x、y 轴的范围均是 0~4，而本例的长宽比比较大，所以呈现出狭长的图形。又由于本例是对称问题，所以只显示了模型的一半网格。

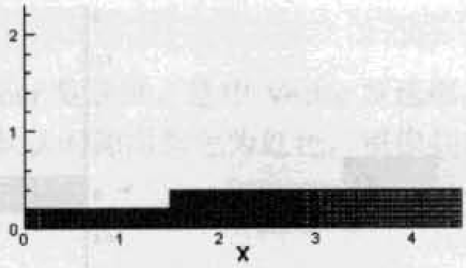


图10-103 刚导入数据文件的帧视图

单击 x 轴或 y 轴，使其显示为黑色方块包裹的状态，然后双击，弹出如图 10-104 所示的 Axis Details 对话框，在 Rang 选项卡中设置 x 轴与 y 轴合适的尺寸范围，得到如图 10-105 所示的网格图。

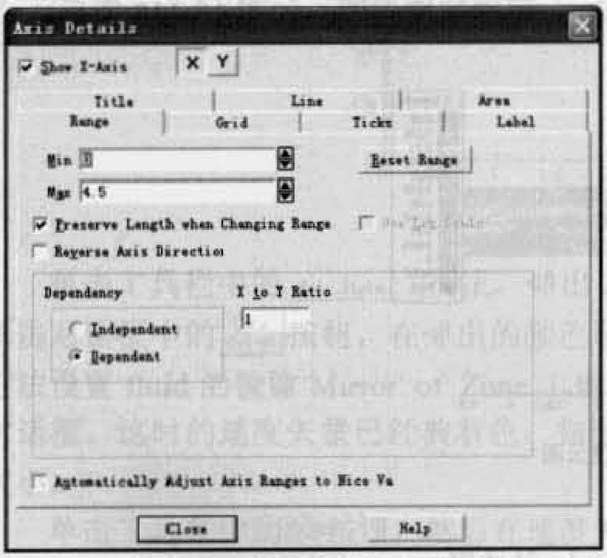


图10-104 Axis Details 对话框

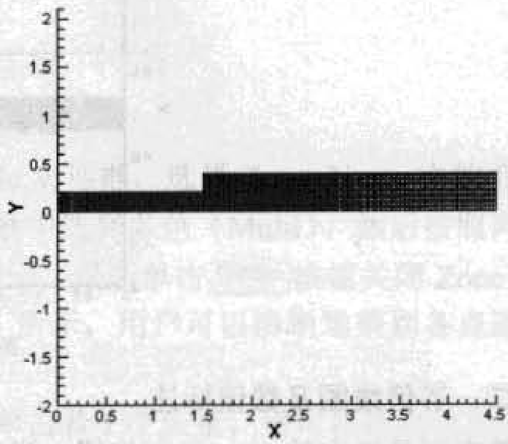


图10-105 改变坐标轴尺寸范围后的网格图

执行 Data→Create Zone→Mirror...命令，在图 10-106 所示的 Create Mirror Zone 对话框中选择 Mirror Axis 为 X-Axis，选择 Source Zone(s)中的 fluid，单击 Create 按钮，即会生成镜像区域 Mirror of Zone 1。然后按照同样方法，依次生成 Source Zone(s)中 bimian、out 和 in 的镜像，这时的网格图如图 10-107 所示。

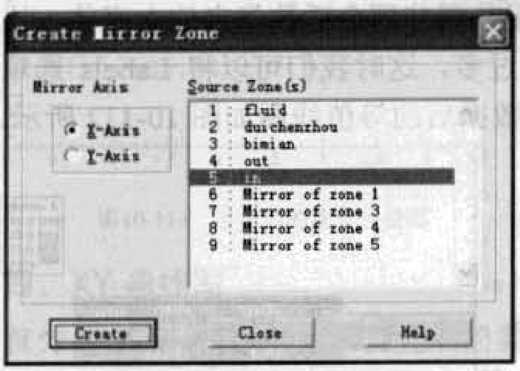


图10-106 Create Mirror Zone 对话框

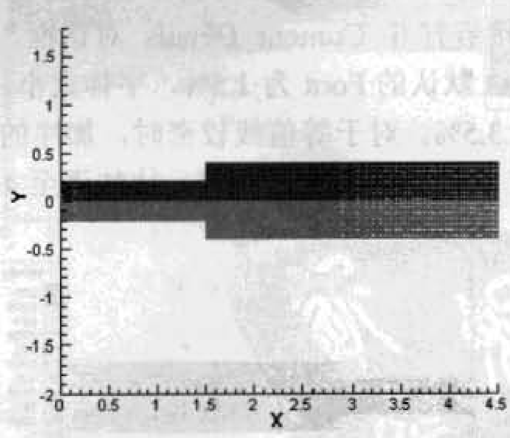


图10-107 镜像后的网格图

在工具栏中取消选中 Mesh 复选框，选中 Contour 复选框，在弹出对话框的 Var 中选择 Pressure，即显示出该问题的压强云图，如图 10-108 所示。接着单击 Contour Details 对话框的 More >> 按钮，选择 Legend 选项卡，并在 Show Contour legend 前打勾，得到有标尺的云图，如图 10-109 所示。

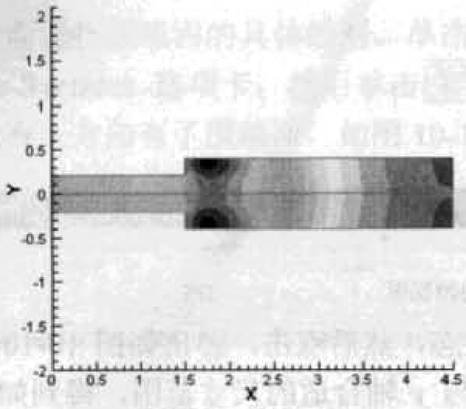


图10-108　压强云图

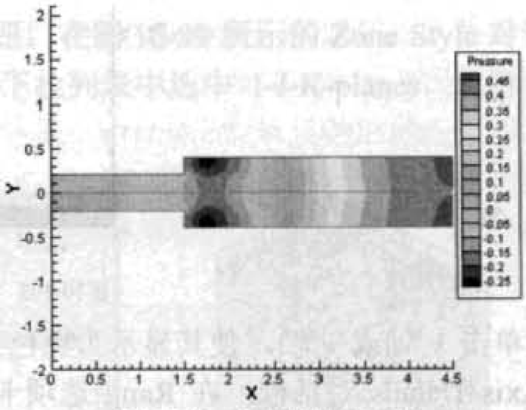


图10-109　有标尺的压强云图

改变 Contour Details 对话框的 Var 为 X Velocity，可得速度云图，如图 10-110 所示。

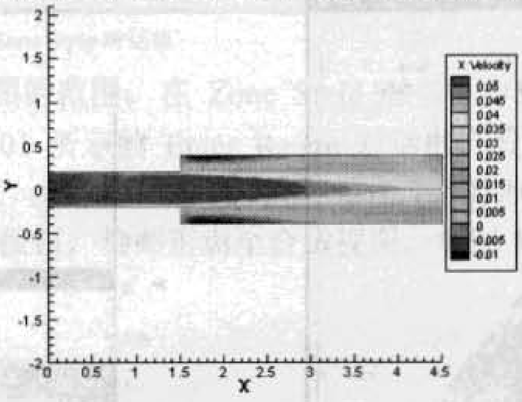


图10-110　速度云图

二、等值线图及数值标注

单击工具栏中的 Zone Style 按钮，弹出 Zone Style 对话框。

在 Contour 选项卡中，选择 Zone Name 中的 fluid，单击 Contour Type 按钮，选择 Both Lines & Flood，即同时显示等值线与云图。然后单击 Line Color 按钮，将等值线颜色设置为黑色。

同理，选择 fluid 的镜像 Mirror of Zone 1，单击 Contour Type 按钮，选择 Both Lines & Flood，然后也将其等值线颜色设置为黑色，此时的等值线图如图 10-111 所示。

接着打开 Contour Details 对话框，选择 Labels 选项卡，并在 Show Labels 前打勾。Tecplot 默认的 Font 为 1.5%，字体太小，我们可以将其调节到合适数值来放大字体，比如调节到 3.5%。对于等值线较密时，加注的数据会显得过多，这时我们可以将 Labels 选项卡的 Level Skip 调大到合适数值，比如调至 4，此时加注数据后的等值线图如图 10-112 所示。

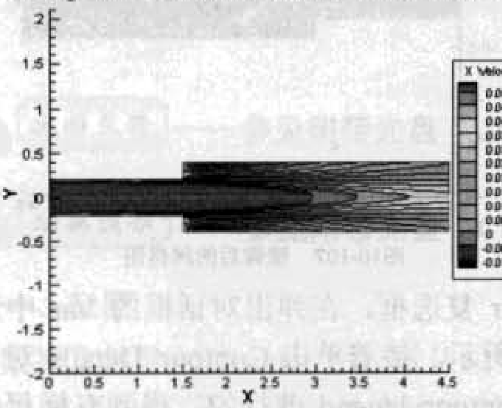


图10-111　等值线图

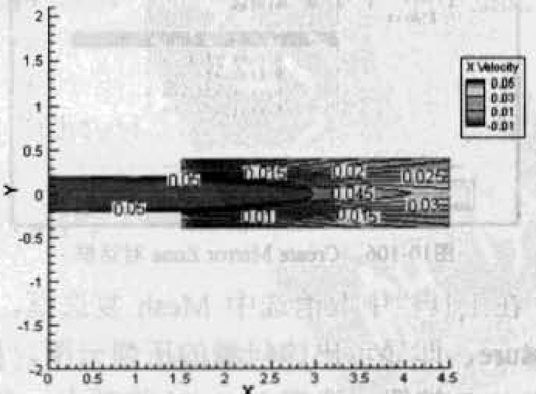


图10-112　加注数据后的等值线图

三、速度矢量图及迹线图

在工具栏中取消选中 Contour 复选框，选中 Vector 复选框。此时，帧窗口中的速度矢量图如图 10-113 所示，Tecplot 默认的源面颜色为红色，镜像颜色为粉红色，均不能反映速度的大小，所以应对其进行着色。

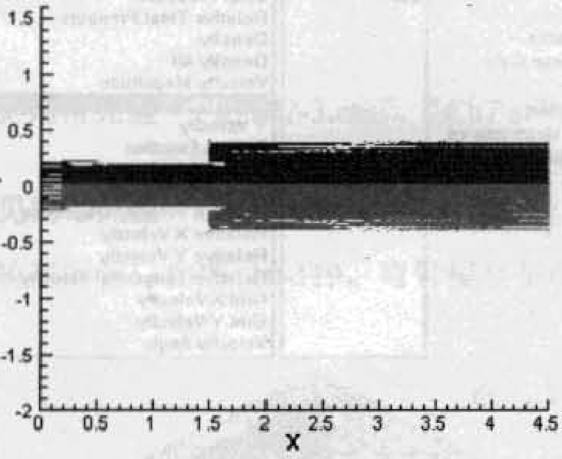


图10-113　初始速度矢量图

单击工具栏中的 Zone Style... 按钮，弹出 Zone Style 对话框，选择 Zone Name 中的 fluid，单击对话框中的 Line Color 按钮，在弹出的颜色选择对话框中选择多色（Multi）。然后按照同样的方法设置 fluid 的镜像 Mirror of Zone 1 也为多色显示，最后单击 Close 按钮关闭 Zone Style 对话框。这时的速度矢量已经被着色，如图 10-114 所示，用户可以清晰地辨别各点速度的大小。

单击工具栏中的按钮，然后在速度矢量图中单击若干个矢量，便可以绘制出如图 10-115 所示的迹线图。

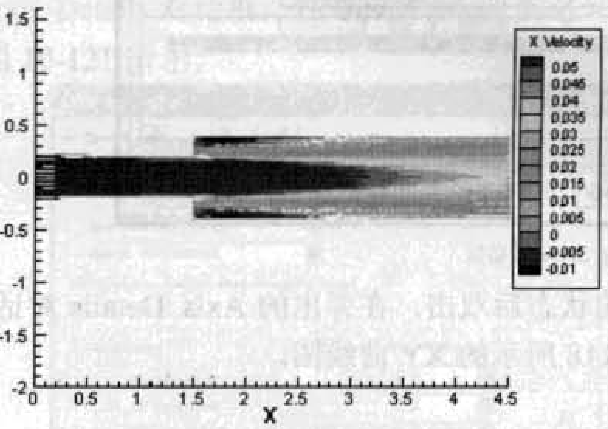


图10-114　着色后的速度矢量图

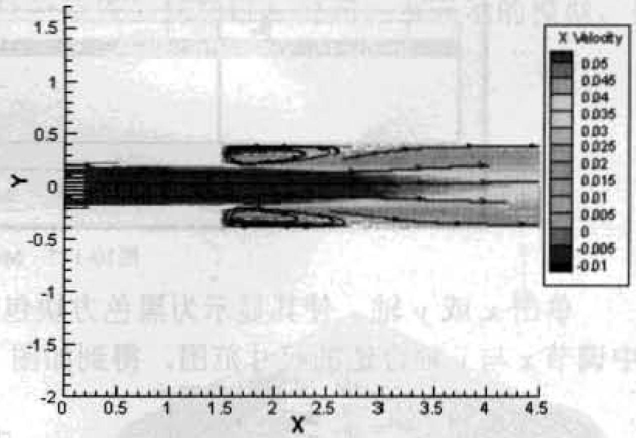


图10-115　迹线图

四、XY 曲线图

首先从 FLUENT 中导出要处理的数据文件，执行 File→Export 命令，弹出如图 10-116 所示的输出文件对话框。选择对话框最左侧 File Type 中的 Tecplot 数据格式，Surfaces 选为 duichenzhou，Functions to Write 选为 X Velocity。单击 Write... 按钮，把管轴线上的 x 方向速度输出为 sl4-2-v_tec.plt 文件。在 Tecplot 中通过 File→Load Data File(s)命令，读取 sl4-2-v_tec.plt 文件。在工具栏的帧模式中选择 XY Line，图层格式则同时选择直线式和符号式两个复选框。

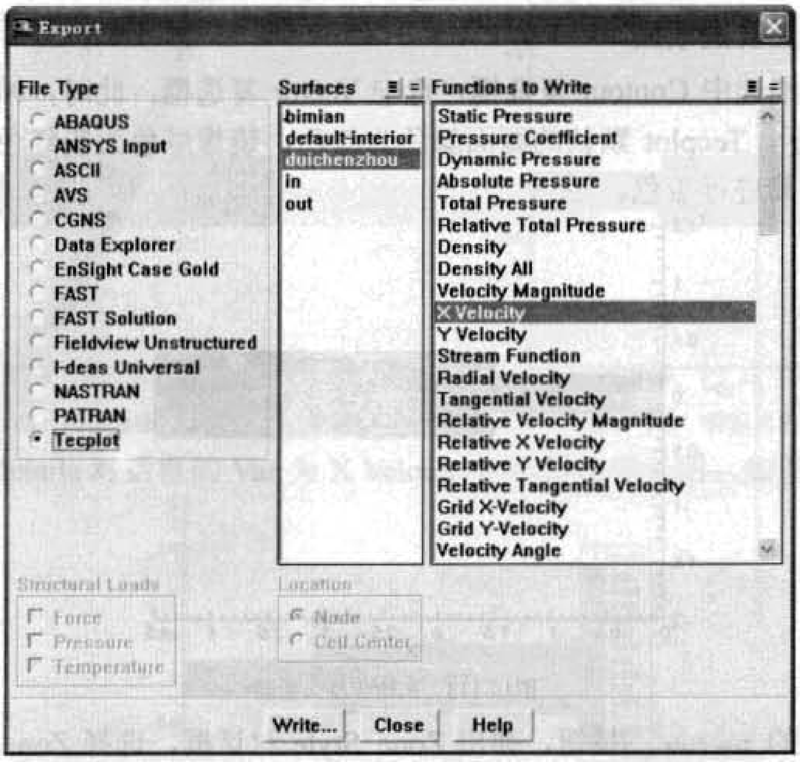


图10-116　导出数据

单击Mapping Style...按钮，在图 10-117 所示对话框中设置曲线的颜色、点符号的间距与大小。

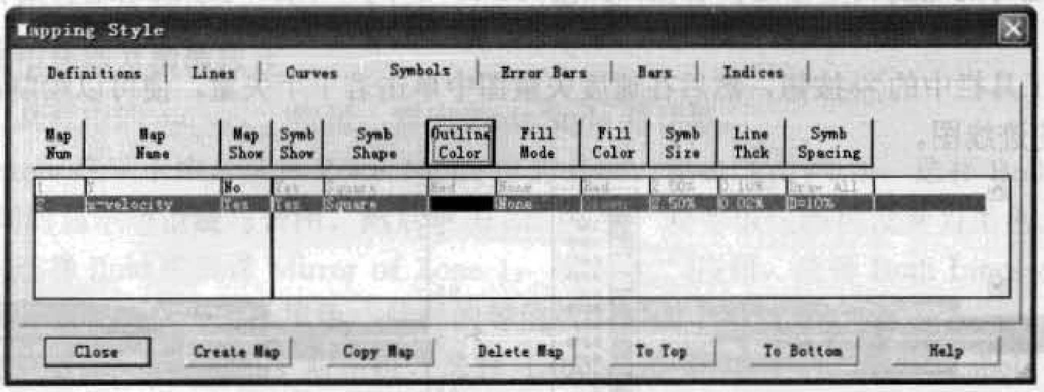


图10-117　Mapping Style 对话框

单击 x 或 y 轴，使其显示为黑色方块包裹的状态后双击，在弹出的 Axis Details 对话框中调节 x 与 y 轴合适的尺寸范围，得到如图 10-118 所示的 XY 曲线图。

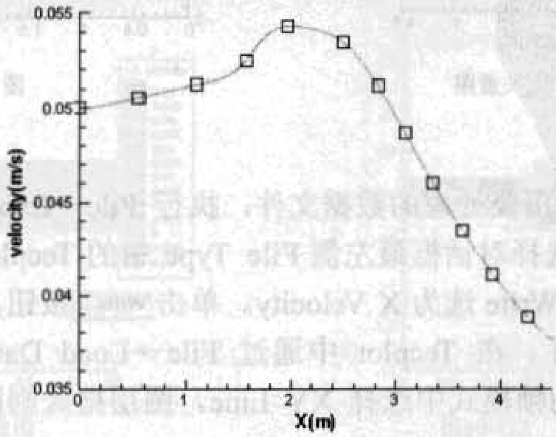


图10-118　流体在管轴上 x 方向的速度曲线图

【实例 10-4】：Tecplot 三维流动后处理实例——弯管内油水两相流动

执行 File→Import 命令，选择 Select Import Format 中的 Fluent Data Loader，单击 OK 按钮。在弹出的对话框中选择 Load Case and Data Files，然后单击 Case File 和 Data File 输入框右侧的 ... 按钮，从硬盘上选择要加载的文件“sl7-3.cas”和“sl7-3-mixture.dat”，单击 OK 按钮。

起始文件——参见附带光盘“Ch7\sl7-3.cas”、“Ch7\sl7-3-mixture.dat”。

动画演示——参见附带光盘“Ch10\AVI\sl10-4.avi”。

导入数据文件后的帧视图窗口如图 10-119，弯管模型呈畸形显示，故需要调节坐标轴的范围。

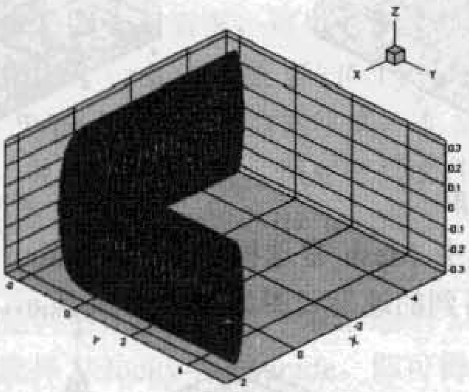


图10-119 导入数据文件后的帧视图

单击 *x*、*y* 或 *z* 轴，使模型区域被黑色方块包裹，然后双击，弹出如图 10-120 所示的 Axis Details 对话框，在 Size Factors 的 Z 输入框中输入 1.184517，得到正常显示的模型，如图 10-121 所示。

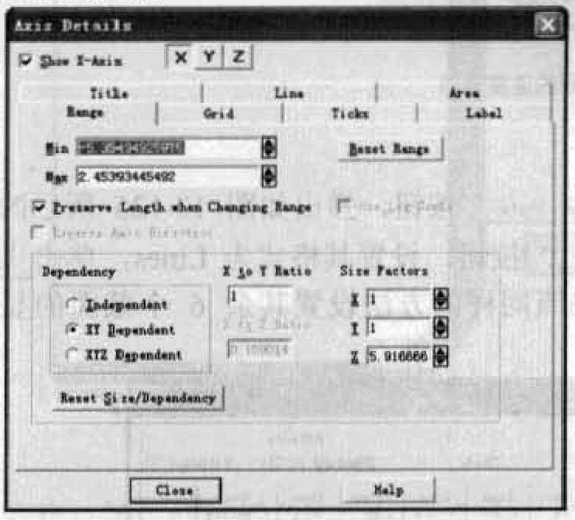


图10-120 Axis Details 对话框

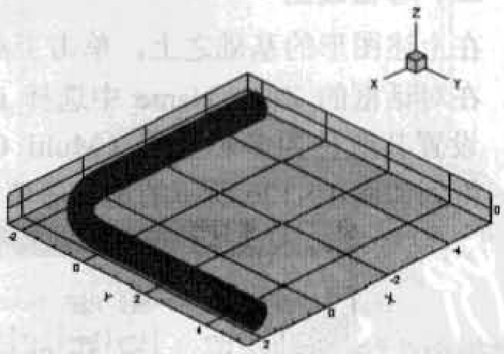


图10-121 正常显示的网格图

一、云图

在工具栏中取消选中 Mesh 复选框，选中 Contour 复选框，在弹出对话框的 Var 中选择 Pressure，即显示出该问题的压强云图，如图 10-122 所示。

这里的云图只能看到外表面的分布情况，不能体现内部的变化。因此，我们仍然采取切

面的形式来呈现沿流程不同横剖面上物理变量的变化情况。

在 FLUENT 中导入“sl7-3.cas”和“sl7-3-mixture.dat”文件，执行 File→Export 命令，弹出 Export 对话框。选择对话框最左侧 File Type 为 Tecplot 数据格式，在 Surfaces 选择“in”、“out”、“x-p”、“x=-2.5”、“x=0”、“y=0”及“y=2.5”7 个截面，Functions to Write 选为 Velocity Magnitude。单击 Write... 按钮，把 7 个截面上的速度输出为 sl7-3-v_tec.plt 文件。在 Tecplot 中通过 File→Load Data File(s)命令，读取 sl7-3-v_tec.plt 文件，得到如图 10-123 所示的帧视图。

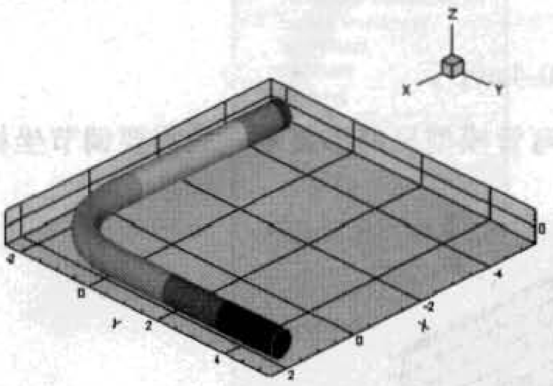


图10-122　三维压强云图

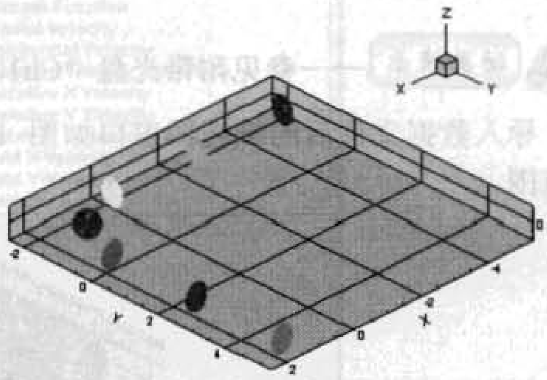


图10-123　7 个截面的网格图

同样，在工具栏中取消选中 Mesh 复选框，选中 Contour 复选框，在弹出对话框的 Var 中选择 Velocity-magnitude，得到的速度云图如图 10-124 所示。

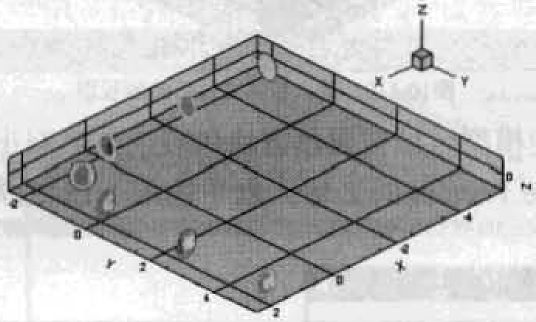
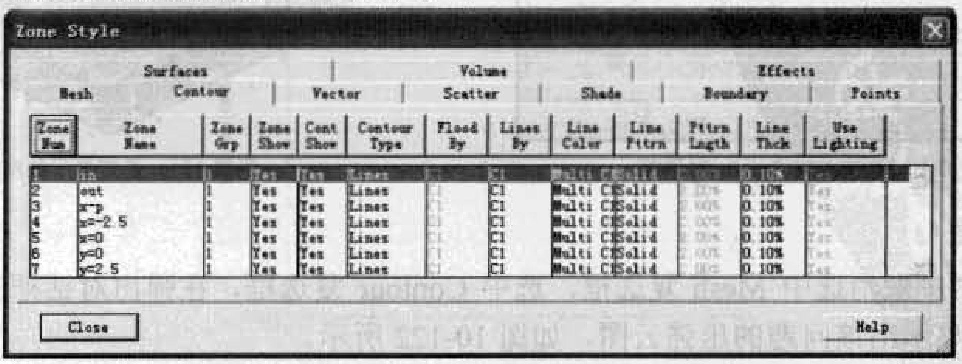


图10-124　7 个截面的速度云图

二、等值线图

在上述图形的基础之上，单击工具栏中的 Zone Style... 按钮，弹出如图 10-125 所示的对话框。在对话框的 Zone Name 中选择 in，单击 Contour Type 按钮，设置其格式为 Lines，单击 Line Color 按钮，设置其颜色为多彩显示（Multi Color）。按照同样的方法设置其余 6 个截面的显示方式，得到如图 10-126 所示的速度等值线图。



Zone Num	Zone Name	Zone Grp	Zone Show	Cont Show	Contour Type	Flood By	Lines By	Line Color	Line Pttrn	Pttrn Lngth	Line Thck	Use Lighting
1	in	1	Yes	Yes	Lines	C1	C1	Multi C	Solid	2.00%	0.10%	Yes
2	out	1	Yes	Yes	Lines	C1	C1	Multi C	Solid	2.00%	0.10%	Yes
3	x-p	1	Yes	Yes	Lines	C1	C1	Multi C	Solid	2.00%	0.10%	Yes
4	x=-2.5	1	Yes	Yes	Lines	C1	C1	Multi C	Solid	2.00%	0.10%	Yes
5	x=0	1	Yes	Yes	Lines	C1	C1	Multi C	Solid	2.00%	0.10%	Yes
6	y=0	1	Yes	Yes	Lines	C1	C1	Multi C	Solid	2.00%	0.10%	Yes
7	y=2.5	1	Yes	Yes	Lines	C1	C1	Multi C	Solid	2.00%	0.10%	Yes

图10-125　Zone Style 对话框

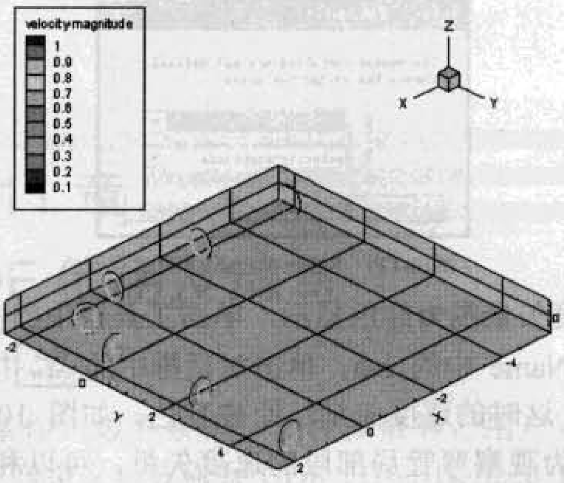


图10-126 7 个截面的速度等值线图

若用户想得到更清晰的速度沿程分布情况，可以绘制沿轴向横剖面的二维图形。

在 FLUENT 中输出轴向横剖面（z-h）速度（Velocity Magnitude）的 Tecplot 数据，即选择 Export 对话框最左侧 File Type 为 Tecplot 数据格式，在 Surfaces 选择 z-h，Functions to Write 选为 Velocity Magnitude，单击 Write... 按钮，保存数据文件为 sl7-3-hv_tec.plt。在 Tecplot 中通过 File→Load Data File(s)命令，读取 sl7-3-hv_tec.plt 文件，得到如图 10-127 所示的帧视图。

此时的视图仍默认显示的是网格，在工具栏中取消选中 Mesh 复选框，选中 Contour 复选框，在弹出对话框的 Var 中选择 Velocity-magnitude，即可得到该横剖面上的速度云图。

接着单击工具栏中的 Zone Style... 按钮，在弹出对话框的 Zone Name 中选择 z-h，单击 Contour Type 按钮，设置其格式为 Lines，单击 Line Color 按钮，设置其颜色为多彩显示（Multi Color），此时的速度等值线如图 10-128 所示。

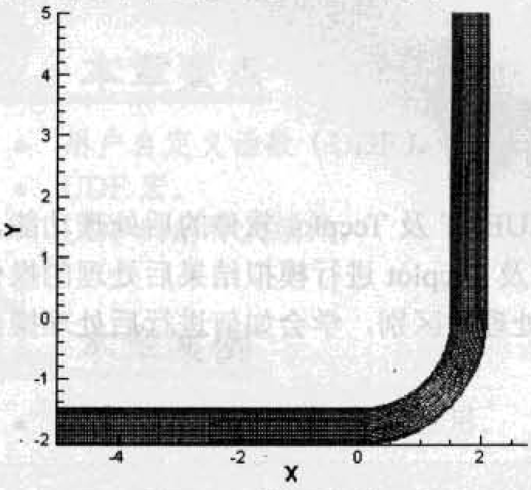


图10-127 横剖面网格

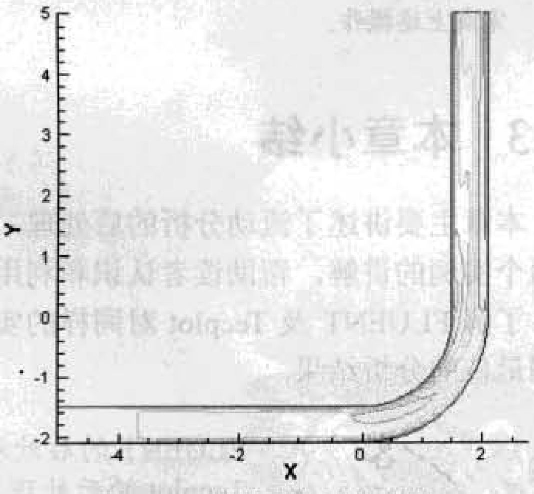


图10-128 横剖面速度等值线图

若想对等值线进行数据标注，可以在 Contour Details 对话框的 Labels 选项卡中进行相关设置，前面已有详细讲述，这里不再重复。

三、速度矢量图

在工具栏中取消选中 Contour 复选框，选中 Vector 复选框。弹出如图 10-129 所示的 Select Variables 对话框，在 U 中选择 X，单击 OK 按钮。

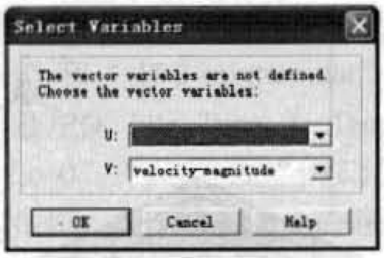


图10-129　Select Variables 对话框

此时，帧窗口中的速度矢量图为红色显示，单击工具栏中的 Zone Style... 按钮，弹出 Zone Style 对话框，选择 Zone Name 中的 z-h，单击对话框中的 Line Color 按钮，在弹出的颜色选择对话框中选择多色（Multi）。这时的速度矢量已经被着色，如图 10-130 所示，用户可以清晰地辨别各点速度的大小。为观察弯管局部段的速度矢量，可以利用鼠标中键及右键调整视图，得到如图 10-131 所示的局部放大图。

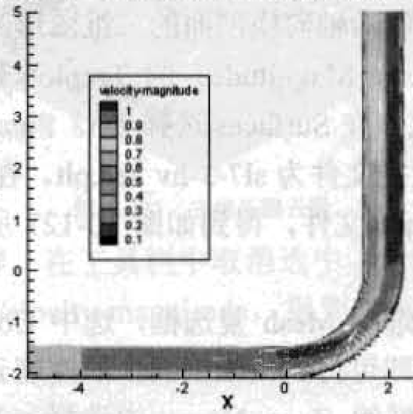


图10-130　速度矢量图

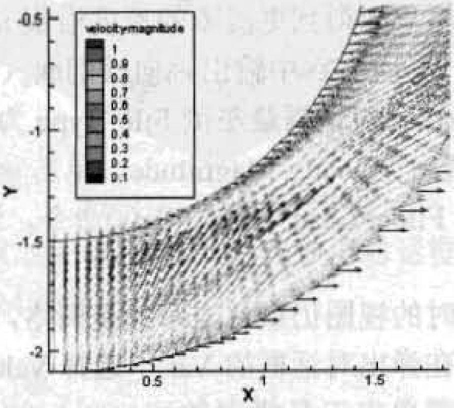


图10-131　弯管局部段的速度矢量图

注意：除了鼠标中键和右键可以完成图形的放大和移动操作外，工具栏上的 及 按钮也可以帮助读者完成上述操作。

10.3　本章小结

本章主要讲述了流动分析的后处理，介绍了 FLUENT 及 Tecplot 软件的后处理功能，通过两个实例的讲解，帮助读者认识和利用 FLUENT 及 Tecplot 进行模拟结果后处理的操作过程，了解 FLUENT 及 Tecplot 对同样的实例进行后处理的区别，学会如何进行后处理操作以得到最佳的分析结果。

备忘录

- FLUENT 的后处理功能。
- Tecplot 的后处理功能。
- 利用 FLUENT 及 Tecplot 软件进行后处理分析的操作过程。

第 11 章 UDF 使用及编写

对于一些复杂的初始条件、边界条件、物性参数等，用户可以自定义相关程序导入 FLUENT 中使用。这类用户自定义函数称为 UDF（User-Defined Function，简称 UDF），是用户自编的程序，可以被动态地连接到 FLUENT 求解器以提高求解器的性能。

标准的 FLUENT 界面并不能满足每个用户的需要，UDF 的使用可以定制 FLUENT 代码来满足用户的特殊需要。UDF 用 C 语言编写，使用 DEFINE 宏来定义。UDF 可以使用标准的 C 语言库函数，也可以使用 FLUENT 提供的预定义宏，通过这些预定义宏可以获得求解器得到的数据。自定义函数通过解释或编译导入 FLUENT 中使用，主要用于定制边界条件、材料属性、表面和体积反应率、源项函数等。

尽管 UDF 在 FLUENT 中有广泛的用途，但是并非所有的情况都可以使用 UDF，它并不能访问所有的变量及 FLUENT 模型。

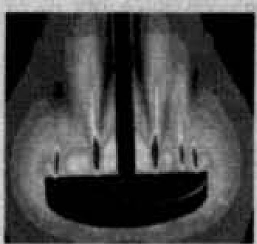
本章将介绍 UDF 的基础知识，UDF 宏及 UDF 的解释与编译，使读者了解 UDF 的基本理论。在此基础之上，通过一个实例讲解 UDF 的基本使用方法，帮助读者掌握 UDF 的基本用法及相关操作过程，为实际工程运用奠定基础。

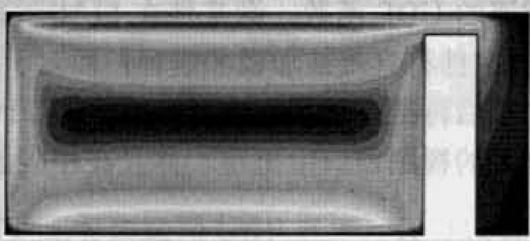
本章要点

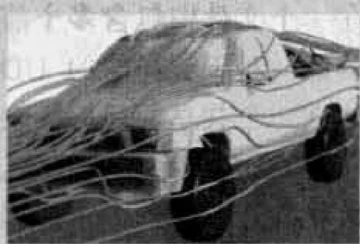
- 用户自定义函数（UDF）。
- UDF 宏。
- UDF 的解释及编译。

本章案例

- 槽道内箱体运动的 UDF 应用。







11.1 用户自定义函数

用户自定义函数允许对 FLUENT 进行个性化设置，这对充分发掘 FLUENT 在功能上的潜力意义深远。下面我们首先介绍 UDF 的基础知识。

11.1.1 UDF 概述

UDF 由 C 语言编写，可以被 FLUENT 求解器动态地加载，从而增强 FLUENT 软件的现有功能。UDF 通过 DEFINE 宏定义，所定义的函数使用预定义宏和函数从 FLUENT 求解器中访问数据。每一个 UDF 都要在程序的开头包含 udf.h 文件（#include "udf.h"），使得在程序编译过程中，DEFINE 宏以及其他由 FLUENT 提供的宏和函数所定义的内容都能被引用。在 FLUENT 中，UDF 作为解释的或编译的函数被执行。不论是 UDF 传送到求解器的值，还是被求解器返回到 UDF 的值，都必须使用国际单位制。

在 FLUENT 中，UDF 可以完成各种不同任务。如果它们在 udf.h 文件中没有被定义为 void，那么它们可以返回一个值。如果它们没有返回一个值，它们还可以修改一个哑元，或修改一个没有被作为哑元传递的变量，或者借助算例文件和数据文件执行输入输出任务。概括地说，UDF 能够完成下列任务。

- 返回一个值。
- 修改一个哑元。
- 返回一个值同时修改一个哑元。
- 修改一个没被作为一个哑元进行传递的变量。
- 从算例文件或数据文件中写入或读出信息。

UDF 允许对 FLUENT 进行特殊设置以便满足建模的特殊需要，其实际应用如下。

- 重新设置边界条件、材料特性、表面和体积反应速率、FLUENT 输运方程中的源项，自定义标量（UDS）输运方程中的源项和扩散函数等。
- 在每次迭代计算后调整计算结果。
- 解的初始化。
- 根据计算要求，非同步执行 UDF。
- 加强后处理过程。
- 加强 FLUENT 中现有的物理模型（例如离散相模型、多相混合物模型、离散点辐射模型）。

UDF 的源文件只能以扩展名".c"保存。通常源文件中只有一个 UDF 函数，但是也允许在一个文件中包含多个前后相连的 UDF 函数。源文件在 FLUENT 中既可以被解释也可以被编译。对于解释型的 UDF，源文件将直接被加载和解释；而对于编译型的 UDF，则首先要建立一个共享的目标模块库，然后再把它加载到 FLUENT 中。一旦解释或编译了 UDF，相应的 UDF 名字将会在 FLUENT 的视图窗口中出现，并且在相应的对话框中通过选择这个函数将其连接到一个求解器中。

11.1.2 网格拓扑

流场的网格是由大量控制体或单元所构成的。每个单元是由一组网格点（或节点），一个单元中心和包围这个单元的面所定义的，如图 11-1 所示。FLUENT 使用内部数据结构定义网格的域，并将单元、单元面和网格中的节点按序排列，从而建立相邻单元之间的连通性。线程是 FLUENT 中数据结构的内部名称，它用来表示一个（边界或单元）区。单元线程是单元的组合，面线程是面的组合。域是 FLUENT 中数据结构的内部名称，它被用来表示网格中的节点、面和单元线程的组合。

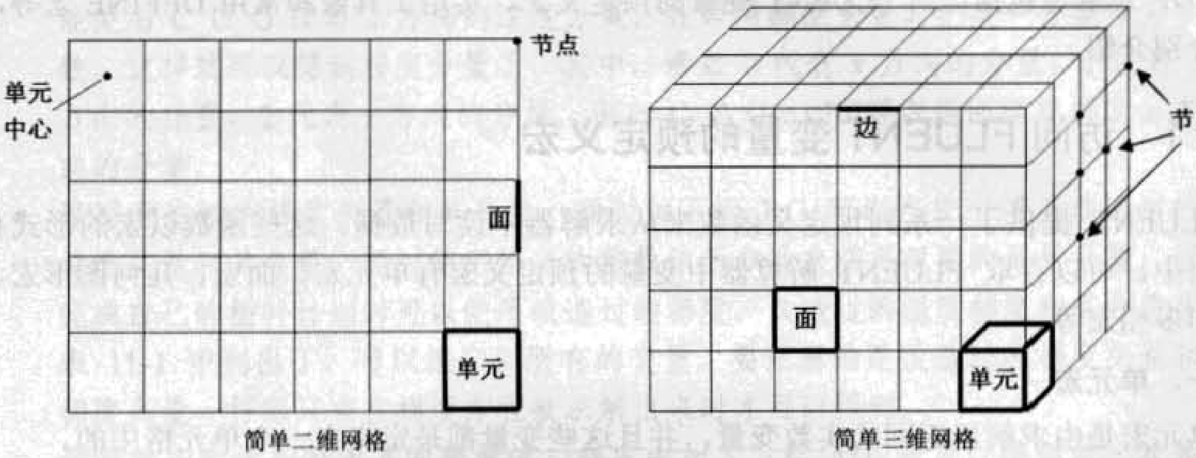


图11-1 网格组分

单元和单元面组成代表流场各个部分的区域（进口、出口、壁面、流动区域等）。一个面围住的是一个还是两个单元（用 c0 和 c1 加以识别）取决于它是一个边界面还是一个内部面。如果是边界面，那么仅有 c0 存在（对于一个边界面，不定义 c1）；如果是内部面，则需要同时定义 c0 和 c1 单元。一个面两侧的单元可以属于同一个单元线程，也可以属于另一个单元线程。

FLUENT 的网格拓扑术语如下。

- 单元（cell）：含有控制体的分离域。
- 单元中心（cell center）：存储单元数据的位置。
- 面（face）：单元（二维或三维）的边界。
- 边（edge）：面（三维）的边界。
- 节点（node）：网格点。
- 单元线索（cell thread）：分配了材料数据和源项的单元组。
- 面线索（face thread）：分配了边界数据的面组。
- 节点线索（node thread）：节点组。
- 区域（domain）：节点、面、单元线索的组合。

11.1.3 数据类型

除了可以使用 C 语言数据类型编写 UDF 之外，还可以直接使用 FLUENT 指定的与求解器数据有关的数据类型，常用的数据类型如下。

- Cell_t 是线索内单元标识符的数据类型，是一个识别给定线索内单元的整数索引。

- Face_t 是线索内面标识符的数据类型，是一个识别给定线索内面的整数索引。
- Thread 是单元或面的组合相关的数据容器。
- Node 是单元或面的拐角相关的数据容器。
- Domain 是 FLUENT 最高水平的数据结构，是一个与网格中所有节点、面和单元线索组合相关的数据容器。

11.2 UDF 宏

UDF 宏主要包括访问 FLUENT 变量的预定义宏、实用工具宏和常用 DEFINE 宏等，下面将分别介绍。

11.2.1 访问 FLUENT 变量的预定义宏

FLUENT 提供了一系列预定义函数来从求解器中读写数据。这些函数以宏的形式存放在代码中。可以存取 FLUENT 解算器中变量的预定义宏有单元宏、面宏、几何图形宏、节点宏和多相宏等。

一、单元宏

单元宏是由求解器返回的实数变量，并且这些变量都是定义在一个单元格中的。

(1) 访问单元流体变量的宏，如表 11-1 所示。

表11-1 在 mem.h 文件中的流体变量宏

名称（参数）	参数类型	返回值
C_T(c,t)	cell_t c,Thread*t	温度
C_T_G(c,t)	cell_t c,Thread*t	温度梯度矢量
C_T_G(c,t)[i]	cell_t c,Thread*t, int i	温度梯度矢量的分量
C_T_RG(c,t)	cell_t c,Thread*t	改造后的温度梯度矢量
C_T_RG(c,t)[i]	cell_t c,Thread*t, int i	改造后的温度梯度矢量的分量
C_T_M1(c,t)	cell_t c,Thread*t	温度的前一次步长
C_T_M2(c,t)	cell_t c,Thread*t	温度的前二次步长
C_P(c,t)	cell_t c,Thread*t	压力
C_DP(c,t)	cell_t c,Thread*t	压力梯度矢量
C_DP(c,t)[i]	cell_t c,Thread*t,int i	压力梯度矢量的分量
C_U(c,t)	cell_t c,Thread*t	*u* 方向的速度
C_V(c,t)	cell_t c,Thread*t	*v* 方向的速度
C_W(c,t)	cell_t c,Thread*t	*w* 方向的速度
C_YI(c,t,i)	cell_t c,Thread*t, int i	物质质量分数
C_K(c,t)	cell_t c,Thread*t	湍流运动能
C_D(c,t)	cell_t c,Thread*t	湍流运动能的分散速率

表 11-1 中有_G、_RG、_M1 和_M2 下标的单元格温度的宏可以应用于除了单元格压力（C-P）外的所有求解器的变量中。这几个下标分别表示矢量梯度、改造的矢量梯度、前一次的步长和前两次的步长。而对于单元格压力，它的矢量梯度和相应的分量是使用 C_DP 得到的，而不是 C_P_G。每一个下标的描述和用法如下。

- 读写梯度矢量及其分量。在宏中加入下标_G 可以得到梯度矢量和它的分量，例如：C_T_G（c,t）可以返回单元格的温度梯度矢量。需要注意的是只有当已经求解出包含这个变量的方程时才能得到梯度变量。例如定义了一个关于能量的源程序，那么所编的 UDF 可以使用 C_T_G 来读写单元格的温度梯度，而不能使用 C_U_G 读写 x 方向的速度分量。在调用梯度矢量时把某一分量作为参数，这样就可以得到梯度分量了，其中，参数 0 代表 x 方向的分量，1 代表 y 方向的分量，2 代表 z 方向的分量。例如 C_T_G(c,t)[0]可以返回温度梯度 x 方向的分量。
- 读写改造过的梯度矢量和其分量。通过加下标_RG 可以在宏中得到改造过的梯度矢量和其分量。通过使用恰当的整数作为参数来获得想要的矢量分量。当完成自己的插补计划时可以使用改造过的梯度。改造过的温度梯度和其分量在表 11-1 中列出了，可以推广到所有的变量。要注意的是改造过的梯度矢量和梯度矢量一样都只有在梯度方程被求解出来时才可以得到。
- 读写前一次步长时间下的变量值。在宏中加入下标_M1 就可以得到前一次步长时间下（t-Δt）的变量值，得到的这些数据可以在瞬态模拟中使用。例如，C_T_M1(c,t)可以返回前一步时间下的单元格温度的值。
- 读写前两次步长时间下的变量值。若在宏中加入下标_M2 就可以得到前两次步长时间下（t-2Δt）的变量值。

(2) 访问导数的宏，用于读写速度导数的宏，如表 11-2 所示。

表11-2　　在 mem.h 文件中访问导数的宏

名称（参数）	参数类型	返回值
C_DUDX(c,t)	cell_t c,Thread*t	U 速度对 x 方向的导数
C_DUDX(c,t)	cell_t c,Thread*t	U 速度对 y 方向的导数
C_DUDZ(c,t)	cell_t c,Thread*t	U 速度对 z 方向的导数
C_DVDX(c,t)	cell_t c,Thread*t	V 速度对 x 方向的导数
C_DVDY(c,t)	cell_t c,Thread*t	V 速度对 y 方向的导数
C_DVDZ(c,t)	cell_t c,Thread*t	V 速度对 z 方向的导数
C_DWDX(c,t)	cell_t c,Thread*t	W 速度对 x 方向的导数
C_DWDY(c,t)	cell_t c,Thread*t	W 速度对 y 方向的导数
C_DWDZ(c,t)	cell_t c,Thread*t	W 速度对 z 方向的导数

(3) 访问材料性质的宏，用于存取材料性质的宏，如表 11-3 所示。

表11-3　　在 mem.h 文件中存取材料性质的宏

名称（参数）	参数类型	返回值
C_FMEAN(c,t)	cell_t c,Thread*t	第一次混合分数的平均值
C_ FMEAN2(c,t)	cell_t c,Thread*t	第二次混合分数的平均值
C_FVAR(c,t)	cell_t c,Thread*t	第一次混合分数变量
C_ FVAR2(c,t)	cell_t c,Thread*t	第二次混合分数变量
C_PREMIXC(c,t)	cell_t c,Thread*t	反应过程变量
C_LAM FLAME SPEED(c,t)	cell_t c,Thread*t	层流焰速度
C_CRITICAL STRAIN RATE(c,t)	cell_t c,Thread*t	临界应变速度
C_POLLUT(c,t)	cell_t c,Thread*t, int i	第 *i* 个污染物的质量分数
C_R(c,t)	cell_t c,Thread*t	密度
C_MU L(c,t)	cell_t c,Thread*t	层流速度
C_MU T(c,t)	cell_t c,Thread*t	湍流速度
C_MU EFF(c,t)	cell_t c,Thread*t	有效粘度
C_K_L(c,t)	cell_t c,Thread*t	热传导系数
C_K_T(c,t)	cell_t c,Thread*t	湍流热传导系数
C_K_EFF(c,t)	cell_t c,Thread*t	有效热传导系数
C_CP(c,t)	cell_t c,Thread*t	确定的热量
C_RGAS(c,t)	cell_t c,Thread*t	气体常数
C_DIFF L(c,t)	cell_t c,Thread*t, int i，int j	层流物质的扩散率
C_DIFF EFF(c,t)	cell_t c,Thread*t, int i	物质的有效扩散率
C_ABS COEFF(c,t)	cell_t c,Thread*t	吸附系数
C_SCAT COEFF(c,t)	cell_t c,Thread*t	扩散系数
C_NUT(c,t)	cell_t c,Thread*t	湍流速度

(4)　访问用户自定义的单元标量和存储器的宏，如表 11-4 所示。

表11-4　　在 mem.h 文件中访问用户自定义的单元标量和存储器的宏

名称（参数）	参数类型	返回值
C_UDSI(c,t)	cell_t c,thread*t,int i	用户定义的单元格标量
C_UDSI M(c,t)	cell_t c,thread*t,int i	前一次步长下用户定义的单元格标量
C_UDSI_DIFF(c,t)	cell_t c,thread*t,int i	用户定义的标量单元格分散率
C_UDMI(c,t)	cell_t c,thread*t,int i	用户定义的单元格存储器

(5)　访问雷诺兹压力模型的宏，如表 11-5 所示。

表11-5　　在 mem.h 文件中访问雷诺兹压力模型读写变量的宏

名称（参数）	参数类型	返回值
C_RUU(c,t)	cell_t c,Thread*t	uu 雷诺兹压力
C_RVV(c,t)	cell_t c,Thread*t	vv 雷诺兹压力
C_RWW(c,t)	cell_t c,Thread*t	ww 雷诺兹压力
C_RUV(c,t)	cell_t c,Thread*t	uv 雷诺兹压力
C_RVW(c,t)	cell_t c,Thread*t	vw 雷诺兹压力
C_RUW(c,t)	cell_t c,Thread*t	uw 雷诺兹压力

二、面宏

面宏是在单元格的边界面上定义的，并且从求解器中返回一个真值，该类宏仅可在偏析求解器中用。

(1) 访问面流体变量的宏，在表 11-6 中列出的宏可以在边界面读写流体变量。注意如果表面在边界上，那么流体的方向是由 F_FLUX 决定的点指向外围空间的。

表11-6　　在 mem.h 文件中访问面流体变量的宏

名称（参数）	参数类型	返回值
F_R(f,t)	face_t f,Thread*t	密度
F_P(f,t)	face_t f,Thread*t	压力
F_U(f,t)	face_t f,Thread*t	*u* 方向的速度
F_V(f,t)	face_t f,Thread*t	*v* 方向的速度
F_W(f,t)	face_t f,Thread*t	*w* 方向的速度
F_T(f,t)	face_t f,Thread*t	温度
F_H(f,t)	face_t f,Thread*t	焓
F_K(f,t)	face_t f,Thread*t	湍流运动能
F_D(f,t)	face_t f,Thread*t	湍流运动能的分散速率
F_YI(f,t,i)	face_t f,Thread*t,int i	物质的质量分数
F_FLUX(f,t)	face_t f,Thread*t	通过边界表面的质量流速

(2) 访问用户自定义的面标量和存储器的宏，如表 11-7 所示。

表11-7　　在 mem.h 文件中访问用户自定义的面标量和存储器的宏

名称（参数）	参数类型	返回值
F_UDSI(f,t,i)	face_t f,Thread*t,,int i	用户确定的表面标量
F_UDMI(f,t,i)	face_t f,Thread*t,,int i	用户定义的表面存储器

(3) 访问混合面变量的宏，如表 11-8 所示。

表11-8　在 mem.h 文件中访问混合面变量的宏

名称（参数）	参数类型	返回值
F_C0(f,t)	face_t f,Thread*t	访问表面\0 边上的单元变量
F_C0_THREAD(f,t)	face_t f,Thread*t	访问表面\0 边上的单元线索
F_C1(f,t)	face_t f,Thread*t	访问表面\1 边上的单元变量
F_C1_THREAD(f,t)	face_t f,Thread*t	访问表面\1 边上的单元线索

三、几何图形宏

几何图形宏是为了在 FLUENT 中重新得到几何变量，包括节点和面的数量、重心、表面积及体积等。

(1) 节点和面的数量，表 11-9 给出了返回节点与面个数的宏。

表11-9　在 mem.h 文件中的节点和表面的宏

名称（参数）	参数类型	返回值
C_NNODES(c,t)	cell_t c,Thread*t	一个单元格中的节点数
C_NFACES(c,t)	cell_t c,Thread*t	一个单元格中的表面数
C_NNODES(f,t)	face_t f,Thread*t	一个表面中的节点数

(2) 单元格和表面的重心，表 11-10 给出了获得单元格或表面重心的宏。

表11-10　在 mem.h 文件中的变量重心宏

名称（参数）	参数类型	返回值
C_CENTROID(x,c,t)	real x[ND ND], cell_tc,,Thread*t	单元格重心的 *x* 值
C_CENTROID(x,f,t)	real x[ND ND],face_t f,Thread*t	表面中心的 *x* 值

(3) 表面积，表 11-11 给出了获得面积向量的宏。

表11-11　在 mem.h 文件中的面积向量宏

名称（参数）	参数类型	返回值
C_AREA(A,f,t)	Ax[ND ND],face_t f,Thread*t	面积向量 *A*

(4) 单元格体积，表 11-12 给出了获得单元格真实体积的宏。

表11-12　在 mem.h 文件中的单元格体积宏

名称（参数）	参数类型	返回值
C_VOLUME(c,t)	cell_tc,,Thread*t	二维或是三维的单元格体积 单元格体积/2π 是轴对称模型的体积

四、节点宏

节点宏主要返回单元格节点的实数直角坐标和相应的节点速度分量。

(1) 节点坐标宏，表 11-13 给出了返回单元格节点的实数直角坐标的宏。

表11-13 在 mem.h 文件中变量的节点坐标宏

名称（参数）	参数类型	返回值
NODE X(node)	Node*node	节点的 x 坐标
NODE Y(node)	Node*node	节点的 y 坐标
NODE Z(node)	Node*node	节点的 z 坐标

(2) 节点速度变量宏，表 11-14 给出了返回单元格节点速度分量的宏。

表11-14 在 mem.h 文件中的节点速度变量宏

名称（参数）	参数类型	返回值
NODE GX(node)	Node*node	节点速度的 X 分量
NODE GY(node)	Node*node	节点速度的 Y 分量
NODE GZ(node)	Node*node	节点速度的 Z 分量

五、多相宏

表 11-15 给出了返回一个与整体多相节点相连的实数变量。

表11-15 在 sg_mphase.h 中的变量宏

名称（参数）	参数类型	返回值
C_VOF(c,pt[0])	cell_t c,,Thread**pt	主要相的体积分数
C_VOF(c,pt[n])	cell_t c,,Thread**pt	第 n 个辅助相的体积分数

11.2.2 实用工具宏

FLUENT 提供了针对其变量操作的一系列工具，这些工具中大部分可以作为宏直接执行。

一、一般目的的循环宏

一般目的的循环宏主要完成基本的查询功能，可以用于 FLUENT 单相和多相模型的 UDF 中。

(1) 查询控制区的单元线。可以用 thread_loop_c 查询给定控制区的单元线，它包含单独的说明，后面是对控制区的单元线所做的操作，包含在{ }中。注意：thread_loop_c 在执行上和 thread_loop_f 相似。

```
Domain *domain;
Thread *c_thread;
thread_loop_c(c_thread, domain) /*loops over all cell threads in domain*/
  {
  }
```

(2) 查询控制区的面。应用 thread_loop_f 可以查询给定控制区的面，它也包含单独的说明，后面是对控制区的面单元所做的操作，包含在{ }中。注意：thread_loop_f 在执行上和 thread_loop_c 相似。

```
Thread *f_thread;
Domain *domain;
thread_loop_f(f_thread, domain)/* loops over all face threads in a domain*/
  {
  }
```

(3) 查询单元线索中的单元。可以应用 begin_c_loop 和 end_c_loop 来查询给定单元线索 c_thread 上所有的单元，它包含 begin_ c_loop 和 end_c_loop 的说明，完成对单元线索中单元所做的操作，定义包含在{ }中。当查找控制区单元线索的单元时，应用的 loop 全嵌套在 thread_loop_c 中。

```
cell_t c;
Thread *c_thread;
begin_c_loop(c, c_thread)      /* loops over cells in a cell thread   */
  {
  }
end_c_loop(c, c_thread)
```

(4) 查询面线索中的面。begin_f_loop 和 end_f_loop 可以用来查找给定面线索 f_thread 的所有的面，它包含 begin_f_loop 和 end_f_loop 的说明，完成对面线索中面单元所做的操作，定义包含在{ }中。当查找控制区面线索的所有面时，应用的 loop 全嵌套在 thread_loop_f 中。

```
face_t f;
Thread *f_thread;
begin_f_loop(f, f_thread)      /* loops over faces in a face thread   */
  {
  }
end_f_loop(f, f_thread)
```

(5) 查询单元中的面。下面的函数用以查询给定单元中所有的面，包含单独的查询说明，后面是所做的操作包含在{ }中。

```
face_t f;
Thread *tf;
int n;
c_face_loop(c, t, n)           /* loops over all faces on a cell */
  {
  ...
  f = C_FACE(c,t,n);
  tf = C_FACE_THREAD(c,t,n);
  ...
  }
```

这里，n 是当前面的索引号。当前面的索引号用在 C_FACE 宏中以获得所有面的数量（如，f = C_FACE(c,t,n)）。

另一个在 c_face_loop 中有用的宏是 C_FACE_THREAD。这个宏用于合并两个面线索（如，tf = C_FACE_THREAD(c,t,n)）。

(6) 查询单元节点。当想查询给定单元中所有节点时，可以使用 c_node_loop 函数，它包含单独的查询说明，后面是所做的操作，包含在{ }中。

```
cell_t c;
Thread *t;
int n;
c_node_loop(c, t, n)
  {
  ...
  node = C_NODE(c,t,n);
  ...
  }
```

这里，n 是当前节点的索引号。当前节点的索引号用在 C_NODE 宏中以获得所有节点的数量。

二、多相组分查询宏

多相组分查询宏用于多相模型的 UDF 中。

(1) 查询混合物中相的控制区。

sub_domain_loop 宏用于查询混合物控制区的所有相的子区，并可在混合物控制区给每个相区定义指针及相关的 phase_domain_index。注意：sub_domain_loop 宏在执行中和 sub_thread_loop 宏是相似的。

```
int phase_domain_index;       */ index of subdomain pointers   */
Domain *mixture_domain;
Domain *subdomain;
sub_domain_loop(subdomain, mixture_domain, phase_domain_index)
```

sub_domain_loop 的变量是 subdomain、mixture_domain 和 phase_domain_index。

subdomain 是 phase-level domain 的指针，mixture_domain 是 mixture-level domain 的指针。当想用 DEFINE 宏时，mixture_domain（包含控制区变量，如 DEFINE_ADJUST）可通过 FLUENT 求解器自动传递给 UDF，混合物就和 UDF 相关了。如果 mixture_domain 没有显式地传递给 UDF，应用另外一个宏来恢复它。phase_domain_index 是子区指针索引号，初始相的索引号为 0，混合物中其他相则依次加 1。注意：subdomain 和 phase_domain_index 是在 sub_domain_loop 宏定义中初始化的。

(2) 查询混合物的相线索。

sub_thread_loop 宏用于查询所有混合物等值线的相等值线索，并返回每个子区和相关 phase_domain_index 的指针。如果 subthread 指针与进口区域相关，那么这个宏将提供给进口区域每个相面线索指针。

```
int phase_domain_index;
Thread *subthread;
```

Thread *mixture_thread;

sub_thread_loop(subthread, mixture_thread, phase_domain_index)

sub_thread_loop 的自变量是 subthread，mixture_thread 和 phase_domain_index。

subthread 是相线索的指针，mixture_thread 是 mixture-level thread 的指针。当用 DEFINE 宏（包含一个线索自变量）定义时，mixture_thread 通过求解器自动传递给 UDF，使其与混合物相关。如果 mixture_thread 没有显式地传递给 UDF，则需要在调用 sub_thread_loop 之前，调用工具宏来恢复它。phase_domain_index 是子区指针索引号，可以用宏 PHASE_DOMAIN_INDEX 恢复。初始相的索引号为 0，混合物中其他相依次加 1。注意：subthread 和 phase_domain_index 是在 sub_thread_loop 宏定义中被初始化。

(3) 查询混合物中所有单元的线索。

mp_thread_loop_c 宏用于查询混合物控制区所有单元的线索，提供了与混合物等值线有关的相等值线索的指针。当应用到混合物控制区时，和 thread_loop_c 宏是等价的。单元线索第 *i* 相的指针是 pt[i]，这里 *i* 是相控制区索引号 phase_domain_index。pt[i]可以用做宏的自变量。相控制区索引号 phase_domain_index 可以用 PHASE_DOMAIN_INDEX 恢复。

Thread **pt;

Thread *cell_threads;

Domain *mixture_domain;

mp_thread_loop_c(cell_threads, mixture_domain, pt)

mp_thread_loop_c 的自变量是 cell_threads，mixture_domain 和 pt。

cell_threads 是网格线索的指针，mixture_domain 是 mixture-level 控制区的指针，pt 是含有 phase-level 线索的指针数组。

当要用包含控制区变量的宏来定义时，mixture_domain 通过求解器自动传递给 UDF，使其与混合物相关。若 mixture_domain 没有显式地传递给 UDF，应用另外一个工具宏来恢复。注意：pt 和 cell_threads 的值是由查询函数派生出来的。mp_thread_loop_c 一般用于 begin_c_loop 中，begin_c_loop 则用于查询网格线索内的所有网格。当 begin_c_loop 嵌套在 mp_thread_loop_c 中，就可以查询混合物中相单元线索的所有网格了。

(4) 查询混合物中所有的相面线索。

mp_thread_loop_f 用于查询混合物控制区内所有混合物等值线的面线索，并且提供每个与混合物等值线有关的相等值线索指针。在混合物控制区内，和 thread_loop_f 几乎是等价的。当需要相等值线指针时，pt[i]可以作为宏的自变量。phase_domain_index 可以用宏 PHASE_DOMAIN_INDEX 来恢复。

Thread **pt;

Thread *face_threads;

Domain *mixture_domain;

mp_thread_loop_f(face_threads, mixture_domain, pt)

mp_thread_loop_f 的自变量是 face_threads，mixture_domain 和 pt。

face_threads 是面线索的指针，是混合物等值线控制区的指针。pt 是包含相等值线索的指针数组。

当要用包含控制区变量的宏来定义时，mixture_domain 通过 FLUENT 的求解器自动传递给 UDF，使其与混合物相关。若 mixture_domain 没有显式地传递给 UDF，应用另外一个工具宏来恢复。注意：pt 和 cell_threads 的值是由查询函数派生出来的。mp_thread_loop_f 一般用于 begin_f_loop 中，begin_f_loop 则用于查询网格面线索内的所有网格。当 begin_f_loop 嵌套在 mp_thread_loop_f 中，就可以查询混合物中相单元面线索的所有网格了。

三、设置面变量的宏

F_PROFILE 宏可以设置面的变量值，当要生成边界条件的外形或存储新的变量值时，自动调用这一函数。

F_PROFILE(f, t, n)

F_PROFILE 的自变量是 f，面的索引号是 face_t，t 为面上线索的指针，整数 n 是要在边界上设定的变量标志符。这些变量通过 FLUENT 的求解器自动传递给 UDF，不必给它们赋值。例如：进口边界包含总压和总温，二者都在 UDF 中定义。进口边界的变量在 FLUENT 中赋予整数 0，其他赋予 1。当在 FLUENT 的进口边界对话框中定义边界条件时，这些整数值由求解器设定。

四、访问没有赋值的自变量的宏

并非所有的 UDF 都直接把函数所需要的自变量传递给求解器。例如，DEFINE_ADJUST 和 DEFINE_INIT 传递给混合物控制区变量，这里 DEFINE_ON_DEMAND 是没有被传递的自变量。下面提供了通过 DEFINE 函数访问没有被直接传递给 UDF 文件的工具。

(1) Get_Domain。

若控制区指针没有显式地作为自变量传递给 UDF，可以用 Get_Domain 宏恢复控制区指针。

Get_Domain(domain_id);

domain_id 是一个整数，对于混合物控制区其值为 1，在多相混合物模型中其值依次加 1。

在单相流中，domain_id 为 1，Get_Domain(1)将返回流体控制区的指针。

```
DEFINE_ON_DEMAND(wode_udf)
{
  Domain *domain;              /* domain is declared as a variable       */
  domain = Get_Domain(1);   /* returns fluid domain pointer              */
  ...
}
```

在多相流中，Get_Domain 的返回值是混合物等值线索，或单相等值线索，或相等值线索，或相等值线索控制区指针。domain_id 的值在混合物控制区始终是 1，可以用 FLUENT 里的图形用户界面获得 domain_id。

```
DEFINE_ON_DEMAND(my_udf)
{
```

```
Domain *mixture_domain;
mixture_domain = Get_Domain(1);     /* returns mixture domain pointer */
                                    /* and assigns to variable        */
Domain *subdomain;
subdomain = Get_Domain(2); /* returns phase with ID=2 domain pointer*/
                                /* and assigns to variable            */
...
}
```

(2) 通过相控制区索引号使用相控制区指针。

有两个方法可以获得混合物控制区具体相（或子区）的指针，可以用宏 DOMAIN_SUB_ DOMAIN 或 Get_Domain。DOMAIN_SUB_DOMAIN 有两个自变量：mixture_domain 和 phase_domain _index。这个函数返回给定 phase_domain_index 的相指针。注意：DOMAIN_SUB_DOMAIN 在执行上和 THREAD_SUB_THREAD 宏相似。

```
int phase_domain_index = 0;            /* primary phase index is 0 */
Domain *mixture_domain;
Domain *subdomain = DOMAIN_SUB_DOMAIN(mixture_domain,phase_domain_index);
```

mixture_domain 是 mixture-level domain 的指针。

当用包含控制区自变量的宏 DEFINE 时，mixture_domain 自动通过 FLUENT 的求解器传递给 UDF，UDF 就和混合物相关联了。否则，如果 mixture_domain 没有显式地传递给 UDF，则需要在调用 sub_domain_loop 之前，用另外一个宏工具来恢复。

phase_domain_index 是子区指针地索引号。它是一个整数初始相值为 0，以后每相依次加 1。当用包含相控制区变量（DEFINE_EXCHANGE_PROPERTY、DEFINE_VECTOR_EXCHANGE_ PROPERTY）的 DEFINE 宏时，phase_domain_index 是自动通过 FLUENT 的求解器传递给 UDF，UDF 就和互相作用的相相联系了。否则，需要硬代码调用 DOMAIN_SUB_DOMAIN 宏给 phase_ domain_index 指针赋值。如果多相流模型有两相，然后 phase_domain_index 初始相的值是 0，第二相的值为 1。然而，如果多相流模型中有更多的相，需要用 PHASE_DOMAIN_INDEX 宏来恢复与给定控制区的 phase_domain_index。

(3) 通过相控制区索引号使用相等值线索指针。

THREAD_SUB_THREAD 宏可以用来恢复给定相控制区索引号的 phase-level thread (subthread)指针。THREAD_SUB_THREAD 有两个自变量：mixture_thread 和 phase_domain_index。这一函数返回给定 phase_domain_index 的 phase-level 线索指针。注意：THREAD_SUB_THREAD 在执行上与 DOMAIN_SUB_DOMAIN 宏相似。

```
int phase_domain_index = 0;              /* primary phase index is 0   */
Thread *mixture_thread;                  /* mixture-level thread pointer */
Thread *subthread = THREAD_SUB_THREAD(mixture_thread,phase_domain_index);
```

mixture_thread 是 mixture-level 线索的指针。当用包含控制区自变量宏 DEFINE 时，它会自动通过 FLUENT 的求解器传递给 UDF，这样，UDF 就和混合物相关联了。否则，如果混合物控制线索指针没有显式地传递给 UDF，则需要在调用 Lookup_Thread 宏之前，用另外一个宏工具来恢复。

phase_domain_index 为子区指针的索引号。它是一个整数，初始相值为 0，以后每相依次加 1。当要用包含相控制区索引号变量的 DEFINE 宏时，phase_domain_index 通过 FLUENT 的求解器自动传递给 UDF，使 UDF 与具体的相互作用相相关联。否则，需要用硬代码改变宏 THREAD_SUB_THREAD 的 phase_domain_index 值。如果多相流模型中只有两相，那么 phase_domain_index 的初始相是 0，第二个相为 1。若有更多的相，需要用 PHASE_DOMAIN_INDEX 宏来恢复与给定区域相关的 phase_domain_index。

(4) 通过混合物等值线使用相线索指针数组。

THREAD_SUB_THREADS 宏可以用以恢复指针数组 pt，它的元素包含相等值线（子线索）的指针。THREADS_SUB_THREADS 有一个变量 mixture_thread。

```
Thread *mixture_thread;
Thread **pt;     /* initialize pt     */
pt = THREAD_SUB_THREADS(mixture_thread);
```

mixture_thread 是 mixture-level thread 代表网格线索或面线索的指针。当用包含线变量的 DEFINE 宏时，它通过 FLUENT 的求解器自动传递给 UDF，这个函数就和混合物关联了。否则，如果混合物线索的指针没有显式地传递给 UDF，则需要用另一个宏来恢复。

pt[i]数组的元素是与第 *i* 相的相等值线索有关的值，这里 *i* 是 phase_domain_index。当想恢复网格具体相的信息时，可以用 pt[i]作为一些网格变量宏的自变量。例如：C_R(c,pt[i]) 可以用来返回网格点 c 第 *i* 相的密度。指针 pt[i]可以用 THREAD_SUB_THREAD 来恢复，用 *i* 最为自变量。phase_ domain_index 可以用宏 PHASE_DOMAIN_INDEX 来恢复。

(5) 通过相控制区指针调用混合物控制区指针。

当 UDF 有权访问特殊的相等值线索（子区）指针时，可以用宏 DOMAIN_SUPER_DOMAIN 来恢复混合物等值线索控制区指针。DOMAIN_SUPER_DOMAIN 含有一个变量 subdomain。注意：DOMAIN_SUPER_DOMAIN 在执行上和 THREAD_SUPER_THREAD 宏是非常相似的。

```
Domain *subdomain;
Domain *mixture_domain = DOMAIN_SUPER_DOMAIN(subdomain);
```

Subdomain 是多相流混合物控制区相等值线索的指针。当用包含控制区变量的 DEFINE 宏时，它会通过 FLUENT 的求解器自动传递给 UDF，使函数与混合物中的第一相和第二相关联。注意：在当前的 FLUENT 版本中，DOMAIN_SUPER_DOMAIN 将返回与 Get_Domain(1)相同的指针。这样，如果 UDF 可以使用子区的指针，建议使用宏 DOMAIN_SUPER_DOMAIN 来代替 Get_Domain 宏以避免将来的 FLUENT 版本造成的不兼容问题。

(6) 通过相线索指针使用混合物线索指针。

当 UDF 有权访问某一条想恢复混合物等值线索指针的子线索指针时，可以使用宏 THREAD_ SUPER_THREAD。THREAD_SUPER_THREAD 有一个自变量 subthread。

```
Thread *subthread;
Thread *mixture_thread = THREAD_SUPER_THREAD(subthread);
```

subthread 在多相流混合物中是一个特殊的相等值线索指针。当使用包含线变量的 DEFINE 宏时，它通过 FLUENT 的求解器自动传递给 UDF，使函数与混合物中的两相关

联。注意：在执行上和 THREAD_SUPER_THREAD 宏是非常相似的。

(7) 通过区的 ID 使用线索指针。

当想要在 FLUENT 的边界条件对话框中恢复与给定区域 ID 相关的线索指针时，可以使用宏 Lookup_Thread 来实现。例如，假设 UDF 需要对该区域的特殊线索操作（并非查找所有的线索），可以用 DEFINE 宏定义 UDF，而不用将线索指针从 FLUENT 的求解器传递到 UDF。UDF 还可以使用 Lookup_Thread 来获得想要的指针。这一过程分两步：首先，从 FLUENT 的边界条件对话框中获得区域的 ID；然后，使用硬代码作为自变量调用宏 Lookup_Thread。Lookup_Thread 返回与给定区域 ID 相关的线索的指针。可以将线索指针赋给 thread_name，并在 UDF 中使用。

```
int zone_ID;
Thread *thread_name = Lookup_Thread(domain,zone_ID);
```

在多相流的上下文中，通过宏 Lookup_Thread 返回的线索是与控制区自变量相关的相等值线索。

(8) 使用相的控制区指针。

当有权访问与给定相等值线索控制区指针的 domain_id 时，可以使用 DOMAIN_ID 宏来实现。DOMAIN_ID 有一个自变量 subdomain，它是相等值线索控制区的指针。控制区（混合物）的最大等值线索的 domain_id 的默认值是 1。即：如果被传递给 DOMAIN_ID 的控制区指针是混合物控制区的等值线索指针，则函数的返回值为 1。注意：当在 FLUENT 的相对话框中选择需要的相时，宏所返回的 domain_id 是和显示在图形用户界面中的整数值 ID 相同的。

```
Domain *subdomain;
int domain_id = DOMAIN_ID(subdomain);
```

(9) 通过相控制区使用相控制区索引号。

宏 PHASE_DOMAIN_INDEX 返回给定相等值线索控制区（子区）指针的 phase_domain_index。PHASE_DOMAIN_INDEX 有一个自变量 subdomain，它是 phase-level domain 的指针。phase_domain _index 是子区指针的索引号。初始相的值为整数 0，以后每相依次加 1。

```
Domain *subdomain;
int phase_domain_index = PHASE_DOMAIN_INDEX(subdomain);
```

五、访问邻近网格和线索变量的宏

FLUENT 提供了确定邻近网格面和线索变量的宏。在复杂的 UDF 文件中，当查询特定网格或线索的面时，就会用到这个宏。对给定的面 f 和它的线索 tf，两个相邻的网格点为 c0 和 c1。若是控制区附面层上的面则只有 c0，c1 的值为 NULL。通常，当把网格导入到 FLUENT 中时，按照右手定则定义面上节点的顺序，面 f 上的网格点 c0、c1 都存在。下面的宏返回网格点 c0 和 c1 的 ID 和所在的线索。

```
cell_t c0 = F_C0(f,tf);    /* returns ID for c0*/
tc0 = THREAD_T0(tf);        /* returns the cell thread for c0 */
cell_t c1 = F_C1(f,tf);    /*returns ID for c1 */
```

```
tc1 = THREAD_T1(tf);          /* returns the cell thread for c1 */
```

注意：由 F_AREA 和 F_FLUX 返回的信息是直接相关的，这些值从网格 c0 到 c1 返回正值。

六、为网格定义内存的宏

为了存储、恢复由 UDF 网格区域变量的值，可以用 C_UDMI 宏来分配 500 个单元。这些值可以用做后处理。这个在用户定义内存中存储变量的方法比用户定义标量更加有效。

C_UDMI (c, thread, index)

c 是网格标志符号，thread 是网格线指针，index 用于识别数据内存分配。与索引号 0 相关的用户定义的内存区域为 0。在用做内存存放变量之前，首先需要在 FLUENT 的 User-Defined Memory 对话框中分配内存。在图形用户窗口分配的每一个用户定义的内存，都会创建一个新的变量。例如：要指定两个内存分配区，那么两个变量 udm-0 和 udm-1 就会在数据储存器中产生。这些名字将会在后台处理对话框中显示出来。

七、矢量工具

FLUENT 提供了可以用在 UDF 中计算有关矢量的工具，它们在源程序中以宏的形式运行。下面我们详细介绍在 UDF 中可以利用的矢量工具。在矢量工具宏中有个约定俗成的惯例，V 代表矢量，S 代表标量，D 代表一系列三维的矢量。在矢量函数中约定的计算顺序，括号、指数、乘除、加减（PEMDAS）不再适用。相反下划线符号“_”用来表示一组操作数，因此对元素的操作先于形成一个矢量。

(1) NV_MAG：计算矢量平方和的平方根。

NV_MAG(x)

2D：sqrt(x[0]*x[0] + x[1]*x[1]);

3D：sqrt(x[0]*x[0] + x[1]*x[1] + x[2]*x[2]);

(2) NV_MAG2：计算矢量的平方和。

NV_MAG2(x)

2D：(x[0]*x[0] + x[1]*x[1]);

3D：(x[0]*x[0] + x[1]*x[1] + x[2]*x[2]);

(3) ND_ND：在 RP_2D 和 RP_3D 中，常数 ND_ND 定义为 2。如果想在 2D 中建立一个 2×2 矩阵，或在 3D 中建立一个 3×3 的矩阵时，可以用到它。

```
real A[ND_ND][ND_ND]
for (i=0; i<ND_ND; ++i)
for (j=0; J<ND_ND; ++j)
A[i][j] = f(i, j);
```

(4) ND_SUM：计算 ND_ND 的和。

ND_SUM(x, y, z)

2D：x + y;

3D：x + y + z;

(5) ND_SET：产生 ND_ND 的任务说明。

ND_SET(u, v, w, C_U(c, t), C_V(c, t), C_W(c, t))

u = C_U(c, t);

v = C_V(c, t);

if 3D：w = C_W(c, t);

(6) NV_V：完成对两个矢量的操作。

NV_V(a, =, x);

a[0] = x[0]; a[1] = x[1]; etc.

注意：如果在方程 a[0]=x[0]中用+=来代替=，将得到 a[0]+=x[0]。

(7) NV_VV：完成对矢量的基本操作。在下面的宏调用中，“+”符号还可以被符号“-”、“/”、“*”代替。

NV_VV(a, =, x, +, y)

2D：a[0] = x[0] + y[0], a[1] = x[1] + y[1];

(8) NV_V_VS：用来把两个矢量相加（后一项都乘以一常数）。“+”符号可以换成“-”、“*”或“/”，“*”符号可以替换成“/”。

NV_V_VS(a, =, x, +, y, *, 0.5);

2D：a[0] = x[0] + (y[0]*0.5), a[1] = x[1] +(y[1]*0.5);

(9) NV_VS_VS：用来把两个矢量相加（每一项都乘以一常数）。“+”符号可以换成“-”、“*”或“/”，“*”符号可以替换成“/”。

NV_VS_VS(a, =, x, *, 2.0, +, y, *, 0.5);

2D：a[0] = (x[0]*2.0) + (y[0]*0.5), a[1] = (x[1]*2.0) + (y[1]*0.5);

(10) ND_DOT：下列的工具可以计算两个矢量的点积。

ND_DOT(x, y, z, u, v, w)

2D：(x*u + y*v);

3D：(x*u + y*v + z*w);

NV_DOT(x, u)

2D：(x[0]*u[0] + x[1]*u[1]);

3D：(x[0]*u[0] + x[1]*u[1] + x[2]*u[2]);

NVD_DOT(x, u, v, w)

2D：(x[0]*u + x[1]*v);

3D：(x[0]*u + x[1]*v + x[2]*w);

八、与非定常数值模拟有关的宏

用 RP 变量宏有权访问 UDF 中非定常的变量。如可以利用 RP_Get_Real 宏获得流动的时间。

```
real current_time;
current_time = RP_Get_Real("flow-time");
```

表 11-16 是在每个时间步长处理时间信息的 RP 宏列表。

表11-16 每个时间步长处理时间信息的 RP 宏列表

RP 宏	返回信息
RP_Get_Real ("flow-time")	返回当前的计算时间 （秒）
RP_Get_Real ("physical-time-step")	返回当前的计算时间 步长（秒）
RP_Get_Integer ("time-step")	返回当前的计算时间 步长数（秒）

11.2.3 常用 DEFINE 宏

DEFINE 宏一般分为通用的 DEFINE 宏、模型指定的 DEFINE 宏、多相流模型中的 DEFINE 宏、离散相模型中的 DEFINE 宏及动网格模型中的 DEFINE 宏 5 类。

一、通用的 DEFINE 宏

通用的 DEFINE 宏执行一般的访问和操作求解器数据的操作，这些函数都和 FLUENT 中的物理模型无关。

(1) DEFINE_ADJUST(name, d)：DEFINE_ADJUST 宏是一个调节和修改 FLUENT 变量的通用宏。在每一步迭代开始之前，利用该宏函数可以修改流场变量，对流场的某个变量进行积分，或根据流场的变量对边界条件进行调整。该宏函数包括两个哑元：symbol name 和 Domain*d。name 是所指定的 UDF 的名字，d 是一个指针，指向一个 domain 数据，由 FLUENT 求解器传递给 UDF。该宏函数没有返回值。

(2) DEFINE_INIT(name, d)：DEFINE_INIT 宏可以定义一个初始场，在初始化时被执行一次，并在求解器进行了默认初始化之后调用，结果与使用 patch 一样，常被用来在某些指定区域进行流场初始值的设置。该宏函数包括两个哑元：symbol name 和 Domain*d。name 是所指定的 UDF 的名字，d 是一个指针，指向一个 domain 数据，由 FLUENT 求解器传递给 UDF。该宏函数没有返回值。

(3) DEFIINE_ON_DEMAND(name)：DEFIINE_ON_DEMAND 宏可以定义一个按命令执行的 UDF，UDF 只有在接到用户指令被激活的时候才调用，并不和迭代过程联系在一起。该宏函数只有一个哑元：symbol name。name 是所指定的 UDF 的名字，该宏函数没有返回值。

(4) DEFINE_RW_FILE(name, fp)：DEFINE_RW_FILE 被用于定义要写入 cas 或 dat 文件的信息，可以保持或存储任何 data 类型的自定义变量。该宏函数包含两个哑元：symbol name 和 FILE*d。name 是所指定的 UDF 的名字，fp 是一个指针，指向所需写入的文件，由 FLUENT 求解器传递给 UDF。该宏函数没有返回值。

(5) DEFINE_DELTAT(name, d)：DEFINE_DELTAT 宏用于控制非定常问题求解时时间步长的控制和调整，只有在可变时间步长度选项被激活的情况下才可以调用。函数返回值就是时间步长的值。该宏函数包括两个哑元：symbol name 和 Domain*d。name 是所指定的 UDF 的名字，d 是一个指针，指向一个

domain 数据，由 FLUENT 求解器传递给 UDF。该宏函数返回值是实型。

(6) DEFINE_EXECUTE_AT_END(name)：DEFINE_EXECUTE_AT_END 宏在迭代的最后一步或最后一个时间步完成后被执行。如果想在某个特殊时刻计算流量，则可以调用这个宏函数。该宏函数只有一个哑元：symbol name。name 是所指定的 UDF 的名字，该宏函数没有返回值。

除了 DEFINE_EXECUTE_AT_END 之外，还有 DEFINE_EXECUTE_AT_EXIT、DEFINE_EXECUTE_FROM_GUI 和 DEFINE_EXECUTE_ON_LOADING 三个通用宏函数，DEFINE_EXECUTE_AT_EXIT 在退出 FLUENT 任务时执行；DEFINE_EXECUTE_FROM_GUI 在所指定的某个图标或其他 GUI 控件被单击的时候执行；DEFINE_EXECUTE_ON_LOADING 只能用于编译型 UDF 中，在 FLUENT 加载编译完 UDF 时执行。

二、模型指定的 DEFINE 宏

FLUENT 中的模型指定宏比较常用，表 11-17 列举了相关模型指定宏的函数名与功能。

表11-17　相关模型指定宏的函数名与功能

宏函数名称	功能
DEFINE_PROFILE	自定义边界截面上的变量分布
DEFINE_PROPERTY	自定义材料属性
DEFINE_HEAT_FLUX	用于修正壁面的热通量
DEFINE_NET_REATION_RATE	返回所有组分的质量净摩尔反应率
DEFINE_CHEM_STEP	在给定时间步上积分获得所有组分的均相净质量反应率，可用于 EDC 和 PDF 输运模型
DEFINE_SOURCE	定义用户源项
DEFINE_CPHI	部分预混燃烧模型中的混合常数的定义
DEFINE_TURB_PREMIX_SOURCE	定义湍流燃烧率和源项
DEFINE_DIFFUSIVITY	用于定义组分输运方程或者用户自定义标量（UDS）方程中扩散率和扩散系数的确定
DEFINE_DOM_DIFFUSE_REFLECTIVITY	常用于修改界面上的扩散反射率和扩散传播率
DEFINE_DOM_SPECULAR_REFLECTIVITY	改变特殊反射半透明壁面的内表面的发射率
DEFINE_DOM_SOURCE	改变关于离散坐标辐射模型中辐射输运方程中的发射项和散射项等源项
DEFINE_SCAT_PHASE_FUNC	为辐射模型定义辐射分数相函数
DEFINE_SOLAR_INTENSITY	用于太阳辐射模型中定义辐射强度等参数
DEFINE_GRAY_BAND_ABS_COEFF	自定义灰带的吸收系数为温度的某个函数，用于非灰带 DO 辐射模型
DEFINE_VR_RATE	自定义容积化学反应速率表达式
DEFINE_SR_RATE	定义用户表面反应率
DEFINE_NOX_RATE	用于修改热、燃料等各种 NOx 的生成率
DEFINE_SOX_RATE	修改 Sox 的生成率
DEFINE_PR_RATE	在粒子表面反应模型中自定义一个粒子表面反应

宏函数名称	功能
DEFINE_PRANDTL_(D、K、O、T、T_WALL)	用于湍流计算中规定各个湍流参数方程的普郎特数
DEFINE_TRUBULENT_VISCOSITY	自定义一种湍流粘性系数的函数
DEFINE_WALL_FUNCTIONS	自定义壁面函数

三、多相流模型中的 DEFINE 宏

多相流模型中的 DEFINE 宏只能用于多相流模型中，主要宏函数如表 11-18 所示。

表11-18　多相流模型中的 DEFINE 宏

宏函数名称	功能
DEFINE_CAVITATION_RATE	对一个多相混合模型流动建立由于压力张力而导致产生水蒸汽的模型
DEFINE_EXCHANGE_PROPERTY	规定关于多相模型中相间相互作用变量的 UDFs
DEFINE_HET_RXN_RATE	指定多相反应速率
DEFINE_MASS_TRANSFER	指定多相流动问题中的质量传输速率
DEFINE_VECTOR_EXCHANGE_PROPERTY	定义相间速度滑移

四、离散相模型中的 DEFINE 宏

离散相模型中的相关 DEFINE 宏函数及功能如表 11-19 所示。

表11-19　离散相模型中的相关 DEFINE 宏

宏函数名称	功能
DEFINE_DPM_BC	自定义粒子到达边界后的状态
DEFINE_DPM_BODY_FORCE	定义除粒子重力或阻力外的其他体积力
DEFINE_DPM_DRAG	自定义颗粒和流体之间的阻力系数
DEFINE_DPM_EROSION	定义颗粒撞击壁表面后的腐蚀和增长率
DEFINE_DPM_HEAT_MASS	自定义颗粒和连续相流体的传热和传质
DEFINE_DPM_INJECTION_INIT	自定义颗粒入射到流场中的初始条件
DEFINE_DPM_LAW	自定义粒子的定律
DEFINE_DPM_OUTPUT	修改写入取样输出的内容
DEFINE_DPM_PROPERTY	自定义离散相粒子的材料属性
DEFINE_DPM_SCALAR_UPDATE	在每次颗粒位置更新后更新标量的值
DEFINE_DPM_SOURCE	自定义粒子运动方程中的源项
DEFINE_DPM_SPRAY_COLLODE	自定义喷雾模型中液滴间的碰撞算法
DEFINE_DPM_SWITCH	修改粒子定律之间的转换标准
DEFINE_DPM_TIMESTEP	自定义颗粒轨道模型中的时间步长
DEFINE_DPM_VP_EQUILIB	指定平衡蒸汽压力

五、动网格模型中的 DEFINE 宏

动网格模型中的相关 DEFINE 宏函数及功能如表 11-20 所示。

表11-20　　动网格模型中的相关 DEFINE 宏

宏函数名称	功能
DEFINE_GC_MOTION	定义重心移动
DEFINE_GEOM	定义变形的几何区域，重新配置节点
DEFINE_GRID_MOTION	独立控制每个节点的运动
DEFINE_SDOF_PROPERTIES	定义移动物体的六自由度运动规律

11.3 UDF 的解释与编译

UDF 编写好之后需要通过解释或编译将其加载到 FLUENT 中。解释和编译的英文分别为 interpret 和 compile，下面分别介绍。

11.3.1 UDF 的解释

UDF 解释是最简单的加载方法，优点是不需要安装 C 编译器，适合简单的 UDF 程序。

UDF 解释的过程很简单，首先将编写好的 UDF 文件放至工作目录下，然后执行 FLUENT 中的 Define→User-Defined→Functions→Interpreted 命令，弹出如图 11-2 所示的 UDF 解释对话框，在 Source File Name 栏中输入编写好的 UDF 文件名（后缀名为".c"），或利用 Browse... 按钮查找 UDF 文件，单击 Interpret 按钮，即开始了 UDF 的解释。若勾选 Display Assembly Listing 选项，视图窗口中还会显示解释信息列表。如果程序有错误，FLUENT 会提示错误的原因及发生错误的程序行数。



图11-2　UDF 解释对话框

解释成功后，UDF 就已经加载到了工程中，用户可根据需要在边界条件、材料属性或其他对话框中调用。

11.3.2 UDF 的编译

由于有些 UDF 函数不支持解释运行，故需要对其进行编译。编译的前提是必须正确安装 C/C++编译器。

正确安装 C/C++编译器之后，执行 FLUENT 中的 Define→User-Defined→Functions→Compiled 命令，弹出如图 11-3 所示的编译对话框。

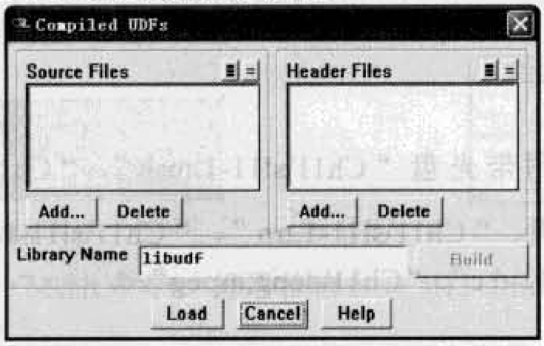


图11-3　UDF 编译对话框

对话框左侧的 Source Files 列表用于增加和显示 UDF 程序，右侧的 Header Files 列表用于增加和显示需要的头文件。单击左侧 Source Files 列表下的 Add... 按钮，在弹出的 Select File 对话框中查找需要加载的 UDF 文件，单击 OK 按钮关闭 Select File 对话框。

回到编译对话框中，即可发现 Source Files 列表中已经出现了加载进来的 UDF 文件名，此时需要用户在 Library Name 中输入共享库的名字，并单击 Library Name 右侧的 Build 按钮，建立一个共享库，同时编译 UDF 文件，并把编译好的 UDF 文件放入该共享库中。若编译正确，则可单击 Load 按钮把编译好的 UDF 文件装载到当前工程中来应用。

【实例 11-1】：槽道内箱体运动的 UDF 应用

在输液管道中经常遇到阻塞情况，如下水道杂物的堆积、输油管内蜡和沥青的沉积等。遇到这种情况时，我们可以采取多种清管措施，其中最简单的方法就是加大流速将障碍物冲出管道，下面我们结合 UDF 介绍一下槽道内箱体在气流冲击作用下的运动情况。

一、实例概述

图 11-4 所示为槽道，在距入口 2.5m 处有一个 1m×1m 的箱体，箱体在入口气流 1m/s 的作用下向右运动。

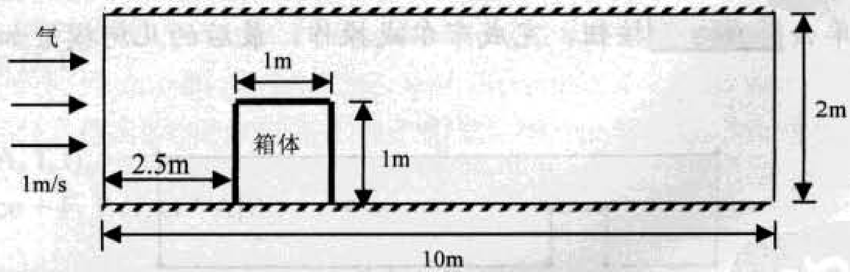


图11-4　槽道箱体运动几何模型简图

思路分析

作用在箱体上的压力是推动其运动的主要力，在压力的作用下箱体向右做加速运动，加速度的大小由压力决定，而压力沿流程又是逐渐改变的，因此本例需要使用 UDF 程序来更新不同位置箱体的运动速度。由于本例箱体是在不断运动的，因此还需要运用动网格模型。

通过本实例的演示过程，读者将学习到：

- UDF 的编写；

- DEFINE_CG_MOTION 宏；
- UDF 的加载；
- 动网格模型；
- UDF 的调用。

结果文件——参见附带光盘“Ch11\sl11-1.msh”、“Ch11\sl11-1.dbs”、“Ch11\sl11-1.jou”、“Ch11\sl11-1.trn”、“Ch11\sl11-1.cas”、“Ch11\sl11-1.dat”、“Ch11\d.c”、“Ch11\dong.mpeg”。

动画演示——参见附带光盘“Ch11\AVI\sl11-1.avi”。

二、模型建立

1. 启动 GAMBIT，首先建立代表槽道的矩形面。单击 → → ，在 Create Real Rectangular Face 面板的 Width 和 Height 栏分别输入 10 和 2，单击 Apply 按钮。然后在 Create Real Rectangular Face 面板的 Width 和 Height 栏都输入 1，单击 Apply 按钮，得到如图 11-5 所示的几何图形。

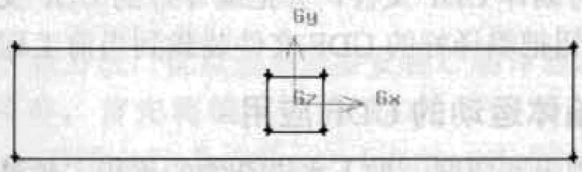


图11-5 矩形面的绘制

2. 下面利用 按钮将代表箱体的面 2 移动至正确位置，即在 Move/Copy Faces 面板中选中面 2，保持 Move 为红色选中，在 X 栏输入-2.5，Y 栏输入-0.5，单击 Apply 按钮完成移动操作。
3. 接下来就是进行面域的布尔操作，单击 Face 面板中的 按钮，在弹出面板的第一行 Face 中选取 face.1（大矩形面），在第二行 Faces 中选取 face.2（小矩形面），单击 Apply 按钮，完成布尔减操作，最后的几何模型如图 11-6 所示。

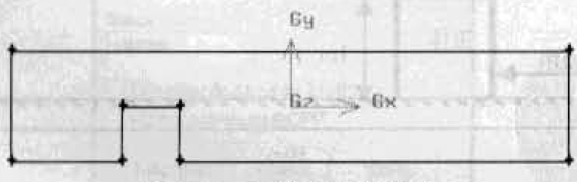


图11-6 建立好的几何模型

三、网格划分

本例可以直接对面域进行面网格划分。

1. 单击 → → ，打开 Mesh Faces 面板。在 Faces 中选取几何模型面域（face.1），设置网格划分方式为 Tri 单元和 Pave 法划分，选择 Spacing 下面的 Interval size，并在左侧输入 0.1，单击 Apply 按钮，生成如图 11-7 所示的面网格。
2. 单击 → ，在 Specify Boundary Types 面板中选择左侧入口边，将其定义

为 VELOCITY_INLET 边界，名称为 in；选择右侧出口边，将其定义为 OUTFLOW 边界，名称为 out；选择箱体的左、右、上 3 条边，将它们定义为 WALL，名称为 x-bian，如图 11-8 所示。



图11-7　面网格

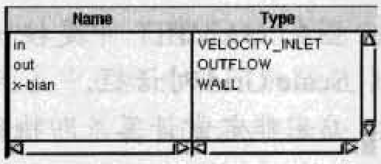


图11-8　边界类型的定义

3.　执行 File→Export→Mesh 命令，将网格输出为 sl11-1.msh。

四、UDF 程序的编写

由于箱体主要沿 x 方向运动，故需定义 x 方向上的力，加速度由力/质量得到。本例的程序如下：

```
#include "udf.h"
static real v_prev = 0.0;
DEFINE_CG_MOTION(moving_body, dt, vel, omega, time, dtime)
{
Thread *t;
face_t f;
real NV_VEC (A);
real force, dv;
NV_S (vel, =, 0.0);
NV_S (omega, =, 0.0);
if (!Data_Valid_P ())
return;
t = DT_THREAD (dt);
force = 0.0;
begin_f_loop (f, t)
{
 F_AREA (A, f, t);
 force = force + F_P (f, t) * A[0];
}
end_f_loop (f, t)
dv = dtime * force / 100.0;
v_prev = v_prev + dv;
vel[0] = v_prev;
}
```

程序编写好后，保存文件名为 d.c，并放至工作目录下。

五、求解计算

1.　启动 FLUENT 二维单精度计算器，执行 File→Read→Case...命令，读入划分

好的网格文件“sl11-1.msh”。

2. 执行 Grid→Check 命令，对网格进行检测，成功检测后窗口界面中最后一行出现“Done”语句。执行 Grid→Scale...命令，弹出 Scale Grid 对话框，本例模型在 GAMBIT 中是按 m 生成的，故保持默认设置即可，单击 Close 按钮关闭 Scale Grid 对话框。
3. 启用非定常计算，即执行 Define→Models→Solver...命令，在弹出的 Solver 对话框中选中 Time 下方的 Unsteady，其余保持默认，单击 OK 按钮。执行 Define→Materials 命令，参照前面介绍的方法调用材料——水。
4. 上述定义完后设置操作环境，执行 Define→Operating Conditions 命令，打开 Operating Conditions 对话框，如图 11-9 所示，保持默认设置，单击 OK 按钮。

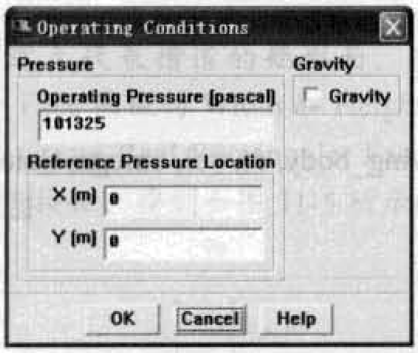


图11-9 操作环境设置

5. 接着定义边界条件，执行 Define→Boundary Conditions...命令，弹出 Boundary Conditions 对话框。左边的 Zone 为待定义的边界名称，右边则为对应的边界类型，本例定义如下。

- 选择 fluid，其类型 Type 为 fluid，单击 Set... 按钮，在 Fluid 对话框中的 Material Name 下拉列表中选择 water-liquid，单击 OK。
- 选择 in，其类型 Type 为 velocity-inlet，单击 Set... 按钮，在图 11-10 所示的 Velocity Inlet 对话框中的 Velocity Specification Method 中选择“Components”，Reference Frame 选为 Absolute，在 Velocity Magnitude（m/s）中输入 1，表示进口速度为 1m/s，最后单击 OK 按钮完成速度进口 in 的设置。

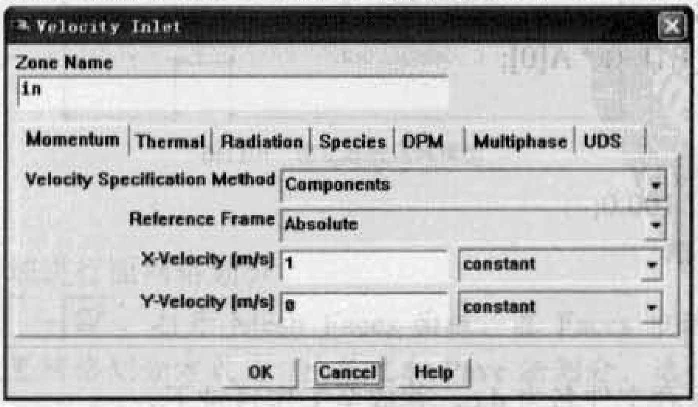


图11-10 速度进口设置

- 选择 out，其类型 Type 为 outflow，单击 Set... 按钮，在 Outflow 对话框的 Flow Rate Weighting 中输入 1，表示进入的水均从该出口流出。

上述步骤设置完后，到了本例的关键一步，即加载 UDF 程序。

6. 执行 Define→User-Defined→Functions→Compiled 命令，弹出如图 11-11 所示的编译对话框，单击对话框左侧 Source Files 列表下的 Add... 按钮，在弹出的 Select File 对话框中查找 UDF 文件 “d.c”，单击 OK 按钮关闭 Select File 对话框。回到编译对话框中，即可发现 Source Files 列表中已经出现了加载进来的 “d.c”，默认 Library Name 中共享库的名字 “libudf”，单击 Library Name 右侧的 Build 按钮，建立一个共享库，同时编译 UDF 文件，此时 FLUENT 视图窗口中会出现编译信息，如图 11-12 所示。编译正确后，单击 Load 按钮把编译好的 “d.c” 加载到当前工程中来。

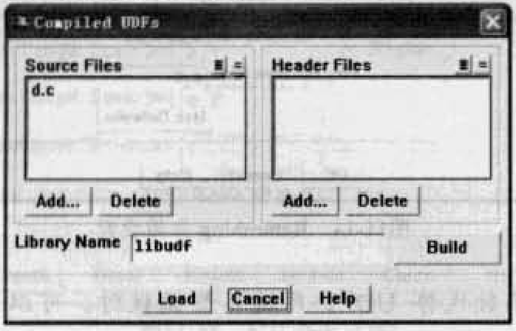


图11-11 编译对话框

```
已复制         1 个文件。
(system "copy D:\Fluent.Inc\fluent6.3.26\src\makefile_nt.udf libudf\ntx86\2d\makefile")
已复制         1 个文件。
(chdir "libudf")()
(chdir "ntx86\2d")()
d.c
# Generating udf_names.c because of makefile d.obj
udf_names.c
# Linking libudf.dll because of makefile user_nt.udf udf_names.obj d.obj
Microsoft (R) Incremental Linker Version 6.00.8168
Copyright (C) Microsoft Corp 1992-1998. All rights reserved.

   Creating library libudf.lib and object libudf.exp

Done.
```

图11-12 编译信息

7. 下一步进行动网格模型的定义，执行 Define→Dynamic Mesh→Parameters 命令，在弹出的 Dynamic Mesh Parameters 对话框中勾选 Dynamic Mesh 选项，对话框自动展开，如图 11-13 所示。在 Smoothing 选项卡输入图示参数。勾选 Mesh Methods 栏中的 Remeshing 选项，单击 Remeshing 选项卡，勾选 Size Function 选项，并输入图 11-14 所示的各参数，单击 OK 按钮。

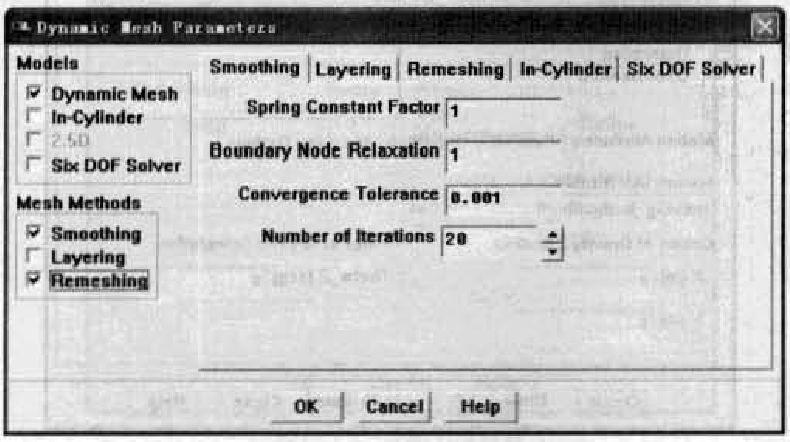


图11-13 Dynamic Mesh Parameters 对话框

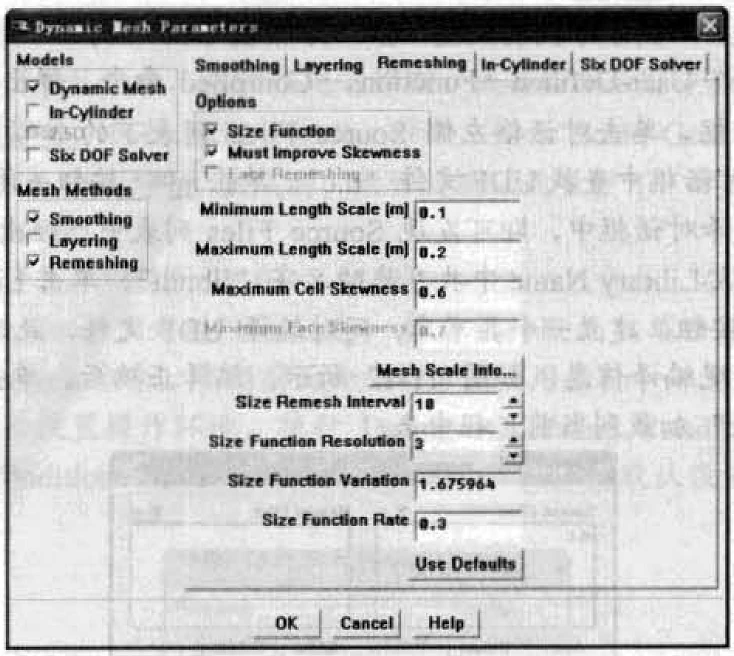


图11-14 Remeshing 参数设置

注意：本例还可以运用边界型函数代替 UDF，用边界型函数时，可以划分为结构网格，并采用动态层（Layering）技术。

8. 执行 Define→Dynamic Mesh→Zones 命令，设置边界型函数的使用对象，选择 Zone Names 下拉列表中的 x-bian，设置其类型 Type 为 Rigid Body（刚体运动），选择 Motion UDF/Profile 下拉列表中的 xt::libudf（上步已经将其导入 FLUENT），保持 Motion Attributes 选项卡中的其他默认设置。选择 Meshing Options 选项卡，设置 Cell Height 为 0.1（邻近网格的尺寸），单击 Create 按钮完成实体的运动设置，如图 11-15 所示。选择 Zone Names 下拉列表中的 wall，设置其类型 Type 为 Deforming（变形），选择 Meshing Options 选项卡，输入图 11-16 所示的参数。最后单击 Close 按钮关闭 Dynamic Mesh Zones 对话框。

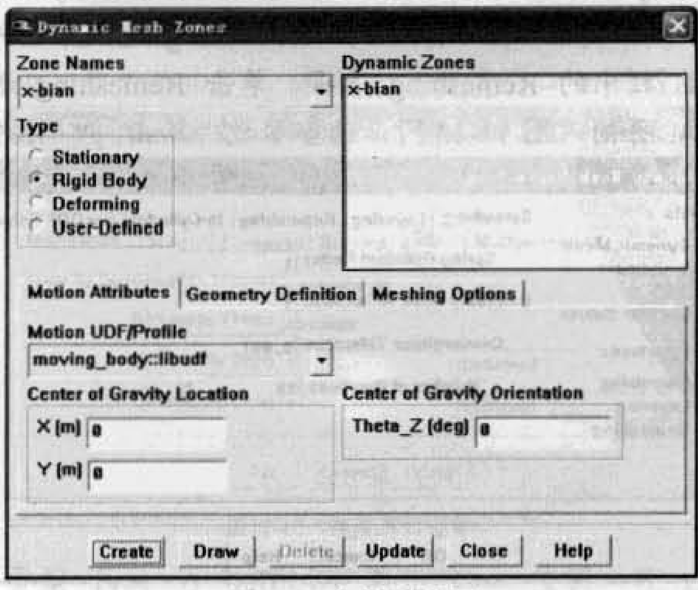


图11-15 实体运动设置

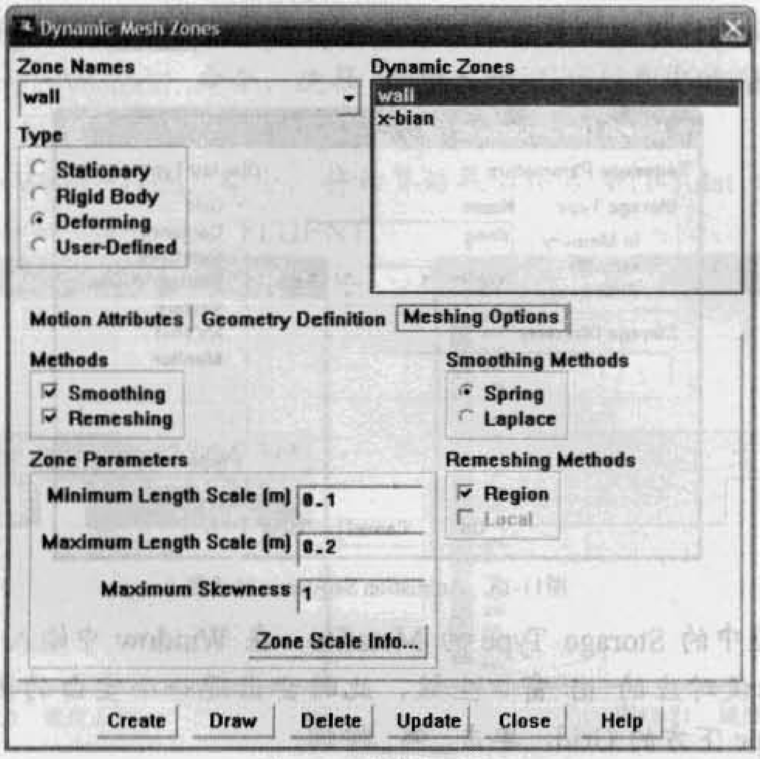


图11-16 底边变形设置

9. 动网格模型设置完后，执行 Solve→Control→Solution...命令，保持默认参数设置，单击 OK 按钮。
10. 接下来对流场进行初始化。执行 Solve→Initialize→Initialize...命令，在 Solution Initialization 对话框中选择 in，顺序单击 Init、Apply、Close 按钮。
11. 初始化后，执行 Solve→Monitors→Residual...命令，在弹出的 Residual Monitors 对话框中选中 Plot，打开残差曲线图。对话框下方的 Criteria 中可以输入各参数的收敛精度要求，FLUENT 默认为 0.001，本例保持默认，单击 OK 按钮。
12. 下面设置本例的动画。执行 Solve→Animate→Define 命令，弹出 Solution Animation 对话框，通过右侧的箭头将数字从 0 调成 1。如图 11-17 所示，在 Name 栏输入 dong，将 When 设置为 Time Step，Every 设置为 10，即每一帧的录像时间为 10 个时间步。

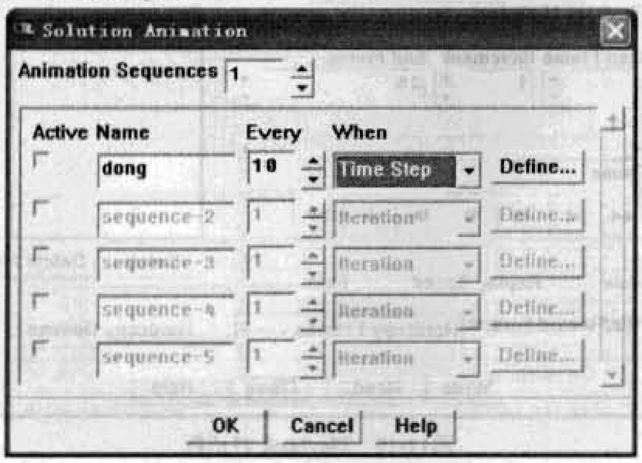


图11-17 动画个数设置

13. 接着对动画进行详细设置，单击第一行最右侧的Define...按钮，弹出如图 11-18 所示的 Animation Sequence 对话框。

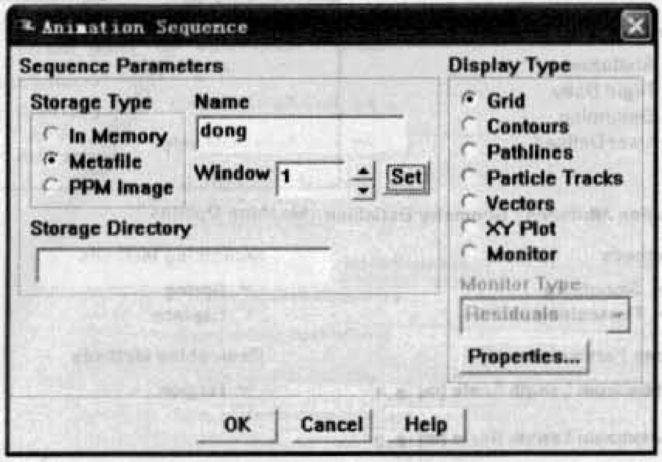


图11-18 Animation Sequence 对话框

14. 选择对话框中的 Storage Type 为 Metafile，在 Window 中输入 1，通过单击右侧Set按钮使对应的 id 窗口生效，此时会出现一个空白的图形窗口。选择 Display Type 下方的 Grid，单击 OK 按钮。
15. 完成上述设置后，执行 File→Write→Case...命令，将工程文件保存为 sl11-1.cas。
16. 执行 Solve→Iterate...命令，设置时间步长 0.05s，时间步为 200，单击 Iterate 按钮开始解算。
17. 迭代完后，执行 Solve→Animate→Playback 命令，打开如图 11-19 所示的动画回放对话框（Playback 对话框），选择 Playback Mode 下拉列表中的 Play Once，即回放一次。选中 dong，保持 Start Frame 为 1，Increment 为 1，End Frame 为 20，即从第 1 帧开始回放直至第 20 帧。拖动 Replay Speed 滚动条可以控制动画回放的速度。最后在 Write/Record Format（保存格式）中选择 MPEG，单击 Write 按钮。此时可以看到窗口 1 中的速度动画开始重新播放，播放的同时，动画在工作目录下保存为 mpeg 的格式文件。

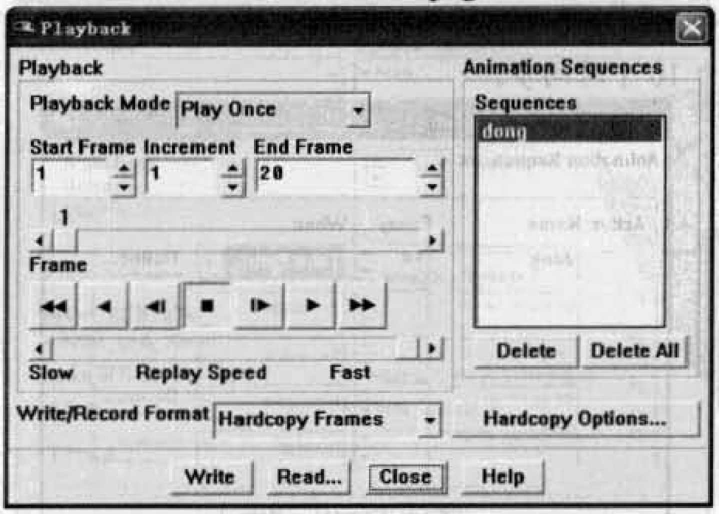


图11-19 Playback 对话框

18. 执行 Display→Contours...命令，选择 Contours of 下拉列表中的 Velocity...和

Velocity Magnitude，得到流速云图，如图 11-20 所示。

19. 执行 Display→Vectors...命令，选择 Vectors of 下拉列表中的 Velocity，得到速度矢量图，如图 11-21 所示。

20. 执行 File→Write→Data...命令，将计算结果保存为 sl11-1.dat 文件。最后执行 File→Exit 命令，安全退出 FLUENT。

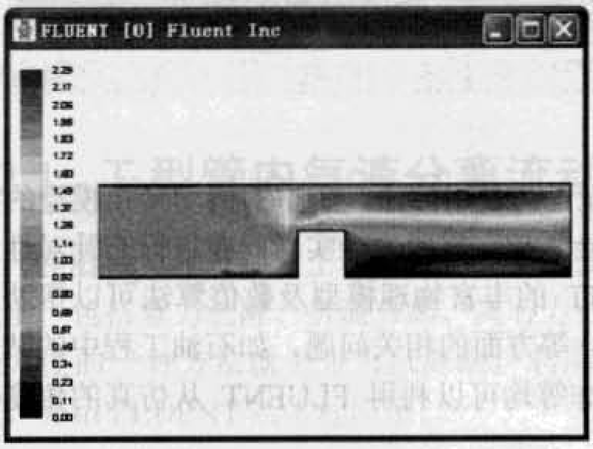


图11-20　速度云图

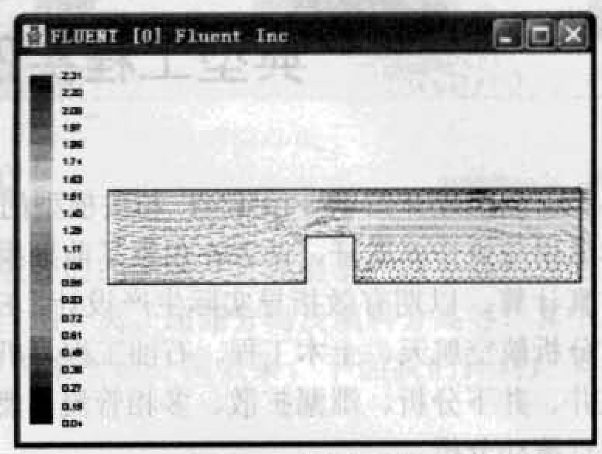


图11-21　速度矢量图

11.4 本章小结

本章主要介绍了 UDF 的基础知识，UDF 宏及 UDF 的解释与编译，重点介绍了 UDF 宏及常用宏的功能，使读者了解了 UDF 的基本理论及宏函数的使用。在此基础上，通过一个实例讲解了 UDF 的基本使用方法，帮助读者掌握 UDF 的基本用法及相关操作过程，为实际工程运用奠定基础。

备忘录

- UDF 基础知识。
- UDF 宏及宏函数的功能。
- UDF 的解释与编译。
- UDF 的调用及操作过程。

第 12 章 典型工程实例

前面已经介绍了 FLUENT 相关模型的基本理论与使用方法，所举实例均紧扣模型的实际运用与操作而展开。读者在积累了前期模拟经验之后，需要结合实际问题进行有针对性的仿真计算，以期有效指导实际生产设计。FLUENT 的丰富物理模型及数值算法可以帮助用户分析航空航天、土木工程、石油工程、机械设计等方面的相关问题，如石油工程中的钻井完井、井下分析、泄漏扩散、多相管流、燃烧爆炸等均可以利用 FLUENT 从仿真的角度去进行流动分析。

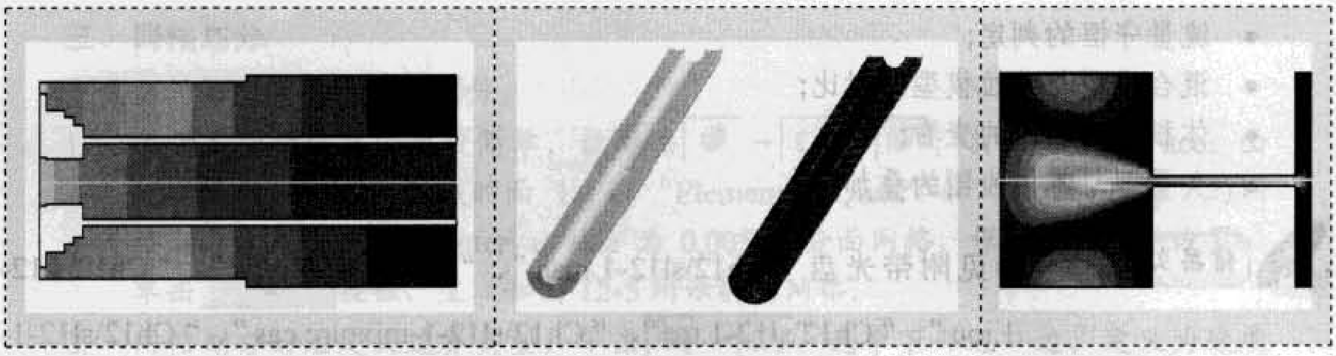
FLUENT 包含湍流模型、多相流模型、传热模型、动网格模型、组分输运与化学反应模型等多个模型，针对具体问题，究竟选择哪个模型，定义何种边界条件，是否要借助 UDF 函数等都是我们面临的实际难题。本章将结合石油天然气、环境、机械等工程领域的典型问题进行 FLUENT 流体分析及仿真的介绍，通过 T 型管内气液分离流动模拟、空气钻井环空气固两相流动模拟、气井井下节流流场模拟等实例的演示，帮助读者掌握解决工程实例的思路，并学会利用 FLUENT 去分析实际问题。由于自然界和工程问题中遇到的绝大部分流动都是多相流动，且常常需要调用 UDF 函数及动网格模型，所以下面我们针对多相流模型、动网格模型及 UDF 的使用，讲述 4 个实际工程中遇到的典型例子，帮助读者掌握解决实际工程问题的思路和方法。

本章要点

- 工程实例的分析思路。
- 模型的选择。
- 多相流模型的使用。
- 可压缩气体流动分析。
- UDF 的工程应用。
- 动网格模型的使用。

本章案例

- T 型管内气液分离流动模拟。
- 空气钻井环空气固两相流动模拟。
- 气井井下节流流场模拟。
- 齿轮泵内流体流动模拟。



12.1 T 型管内气液分离流动模拟

在石油工程及环境工程领域，经常涉及到气液分离的问题，目前用于气液分离的方法有很多，包括重力沉降、折流分离、离心力分离、丝网分离、超滤分离及填料分离等，其中，最方便的一种方法就是重力沉降法，利用 T 型管来实现分离效果。下面我们针对此类问题，介绍 FLUENT 的工程应用。

一、实例概述

图 12-1 所示为一个 T 型管，横管、垂管直径均为 0.03m，水和空气的混合物从下端流入，其中水的进口流速为 1.5m/s；空气的进口流速为 1.6m/s，空气的体积分数为 0.02，气泡直径为 1mm。混合流在 T 型交叉点处分流；下端入口段长 0.15m，上端垂管和横管长都为 0.3m，其中上端出口质量流率为 62%，右侧出口质量流率为 38%。

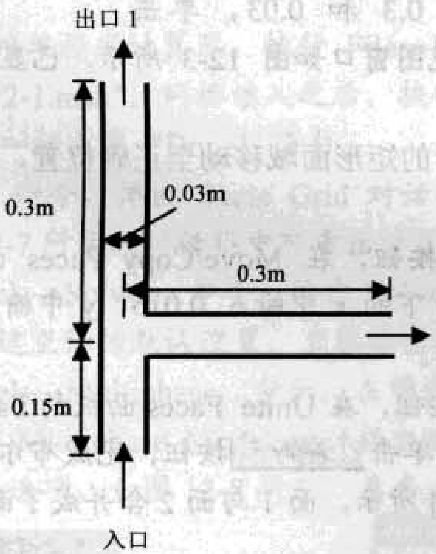


图12-1　T 型管模型示意图

思路分析

本例涉及到气液分离，故需要调用多相流模型，又由于给出的是气泡直径 1mm，所以应将水定义为基本相，而将空气定义为第二相。

通过本实例的演示过程，读者将学习到：

- 多相流模型的使用；
- 相间相互作用的设定；

- 流量守恒的判定；
- 混合模型与欧拉模型的对比；
- 体积分数云图的查看；
- 矢量图与等值线图的叠加。

结果文件——参见附带光盘“Ch12\sl12-1.msh”、“Ch12\sl12-1.dbs”、“Ch12\sl12-1.jou”、“Ch12\sl12-1.trn”、“Ch12\sl12-1-mixture.cas”、“Ch12\sl12-1-mixture.dat”、“Ch12\sl12-1-euler.cas”、“Ch12\sl12-1-euler.dat”。

动画演示——参见附带光盘“Ch12\AVI\sl12-1.avi”。

二、模型建立

1. 双击 GAMBIT 的桌面快捷方式，启动 GAMBIT。

本例模型需要建立两个面域，然后进行布尔加操作生成图 12-1 所示的几何模型。

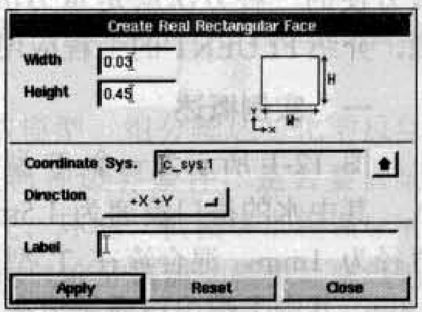


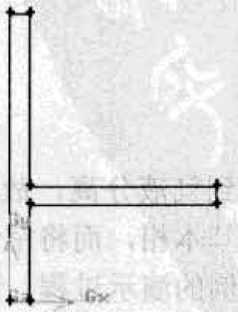
图12-2 Create Real Rectangular Face 面板

2. 单击 → → ，在图 12-2 所示的 Create Real Rectangular Face 面板的 Width 和 Height 中分别输入 0.03 和 0.45，并选择 Direction 为+X+Y，单击 Apply 按钮。
3. 在 Create Real Rectangular Face 面板的 Width 和 Height 栏分别输入 0.3 和 0.03，单击 Apply 按钮。此时的视图窗口如图 12-3 所示，已显示有两个独立的矩形面域。

下面需要将第二个代表横支管的矩形面域移动至正确位置，并与第一个面域合并成一个面。

4. 单击 Face 面板中的 按钮，在 Move/Copy Faces 面板中选择面 2，保持 Move 被选中，在 Global 下的 x 中输入 0.015，y 中输入 0.15，单击 Apply 按钮完成该面的移动操作。
5. 单击 Face 面板中的 按钮，在 Unite Faces 面板的 Face 中选取面 1 和面 2，保持类型 Type 为 Real，单击 Apply 按钮，完成布尔加操作。此时的视图窗口中的几何模型如图 12-4 所示，面 1 与面 2 合并成了面 1。


图12-3 两个独立的矩形面域


图12-4 几何模型

三、网格划分

下面对计算区域进行网格划分。

1. 由于本例的计算区域较简单，故单击 → → ，打开 Mesh Faces 面板，选中本例计算区域的面 1，以“Elements: Quad”和“Type: Map”的网格划分方式，并采用 Interval size 为 0.005 划分面网格，保持其他默认设置，单击 Apply 按钮，生成如图 12-5 所示的面网格。
2. 网格划分好后定义边界类型，单击 → ，选中下部进口边，定义为速度入口边界（VELOCITY_INLET），名称为 in; 选中右侧出口边，定义为自由出流边界（OUTFLOW），名称为 out-y; 同样将上部出口边也定义为 OUTFLOW 边界，名称为 out-s，如图 12-6 所示。

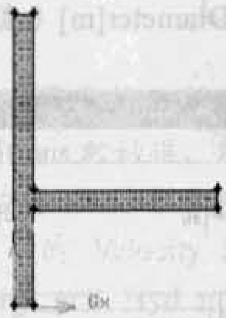


图12-5 模型网格

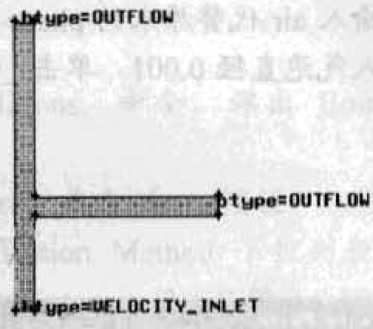


图12-6 边界类型的定义

3. 执行 File→Export→Mesh 命令，将网格输出为 sl12-1.msh。

四、求解计算

1. 启动 FLUENT 二维单精度计算器。执行 File→Read→Case...命令，读入划分好的网格文件“sl12-1.msh”。网格读入之后，执行 Grid→Check 命令，检查网格的信息，待最后一行出现“Done”语句。
2. 执行 Grid→Scale...命令，弹出 Scale Grid 对话框，本例不需要重新定义网格的尺寸，从如图 12-7 所示的对话框中可看出计算区域的尺寸范围。
3. 执行 Define→Models→Solver...命令，弹出 Solver 对话框，多相流模型只能选用压力基求解器，这里保持默认设置，直接单击 OK 按钮。
4. 执行 Define→Models→Multiphase...命令，在弹出的 Multiphase Model 对话框中先选择 Mixture，Multiphase Model 对话框自动展开，勾选 Slip Velocity 和 Implicit Body Force 选项，如图 12-8 所示，单击 OK 按钮，关闭该对话框。

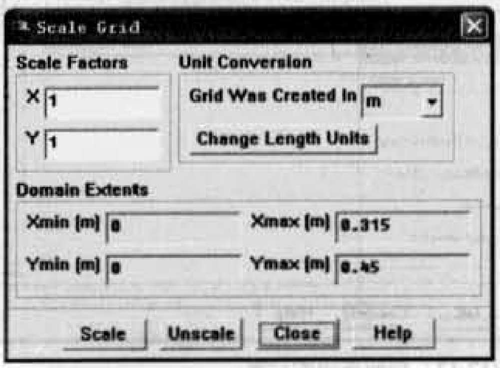


图12-7 Scale Grid 对话框



图12-8 多相流模型设置

5. 启用湍流模型。执行 Define→Models→Viscous...命令，弹出 Viscous Model 对话框，在 Model 选项中选择 k-epsilon[2 eqn]，在 k-epsilon Model 选项下选择 Standard，保留其他默认设置，单击 OK 按钮。
6. 参照前面介绍的方法定义空气和水两种材料。
7. 定义基本相和第二相。执行 Define→Phases...命令，在 Phases 对话框的 Phase 列表中选择 phase-1，在 Type 选项中选择 primary-phase，然后单击 Set... 按钮，在图 12-9 所示对话框的 Phase Material 列表中选择 water-liquid，并在 Name 文本框中输入 water 代替原来的 phase-1，单击 OK 按钮。然后在 Phase 列表中选择 phase-2，在 Type 选项中选择 secondary-phase，单击 Set... 按钮，在图 12-10 所示对话框的 Phase Material 列表中选择 air，并在 Name 文本框中输入 air 代替原来的 phase-2，同时在 Properties 下的 Diameter[m]（直径）中输入气泡直径 0.001，单击 OK 按钮。

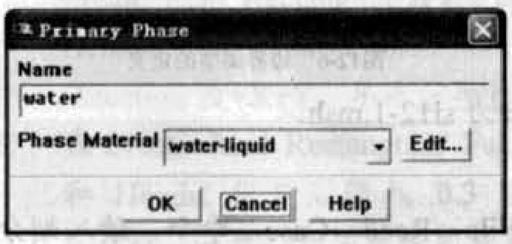


图12-9　基本相设置

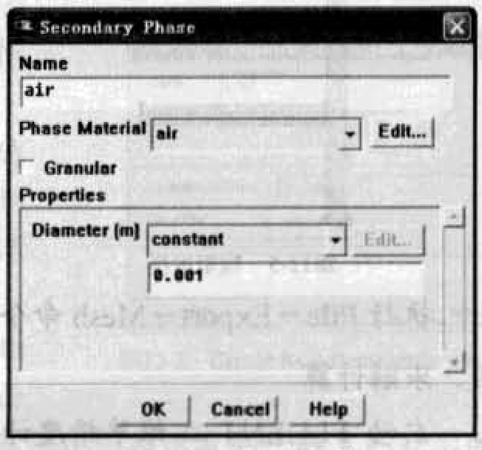


图12-10　第二相设置

8. 回到 Phases 对话框中，单击 Interaction... 按钮，如图 12-11 所示。此时会打开 Phase Intercation 对话框，如图 12-12 所示，我们可以在该对话框中定义不同相间的相互作用。这里选择 Drag Coefficient 中的 schiller-naumann，即定义气泡与水之间使用 schiller-naumann 来计算相间阻力。单击 Slip 选项卡，此时相间的滑移速度公式采用的是默认的 manninen-et-al，保持其设置，单击 OK 按钮，关闭 Phase Intercation 对话框。

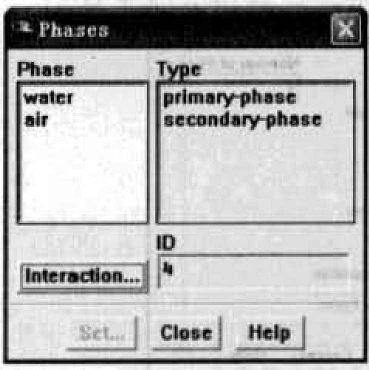


图12-11　Phases 对话框

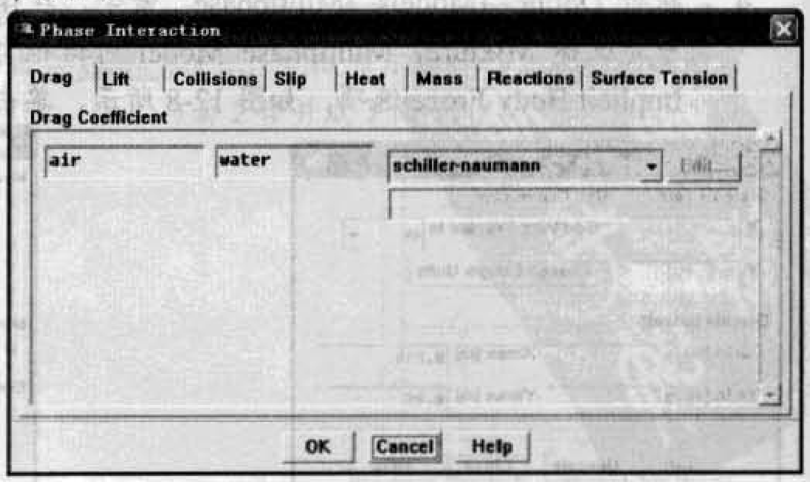


图12-12　相间作用的设置

9. 执行Define→Operating Conditions命令，打开Operating Conditions对话框，如图12-13所示，选中Gravity，指定重力方向为y轴，在Y[m/s2]文本框输入-9.81，同时选择Specified Operating Density项，并在文本框中输入0，单击 OK 按钮。

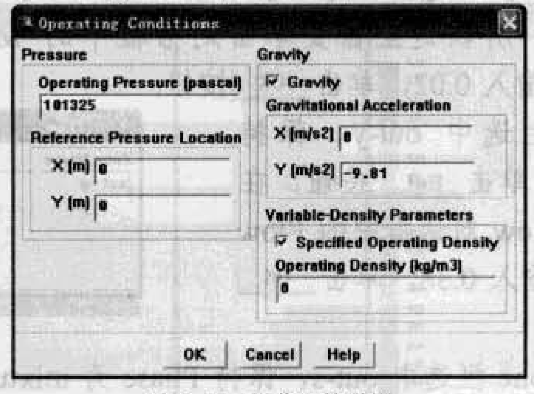


图12-13 操作环境设置

10. 定义边界条件。执行Define→Boundary Conditions...命令，弹出Boundary Conditions对话框，定义如下。

- 在左边的Zone栏选中in，保持Phase为mixture，单击 Set... 按钮，在图12-14所示的Velocity Inlet对话框中选择Specification Method下拉列表中的Intensity and Hydraulic Diameter，在Turbulent Intensity[%]中输入10，在Hydraulic Diameter[m]中输入0.03，单击 OK 按钮。

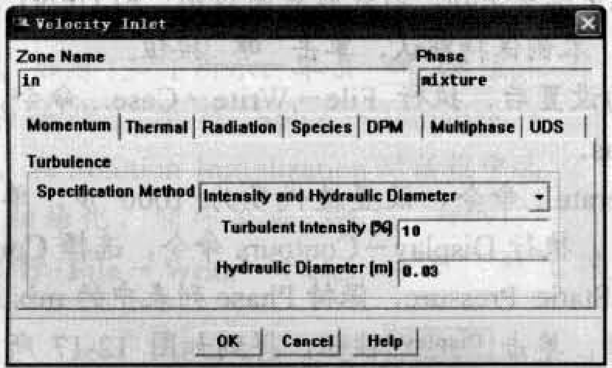


图12-14 混合物速度进口设置

- 回到Boundary Conditions对话框，仍选择in，改变Phase为water，单击 Set... 按钮，在图12-15所示的Velocity Inlet对话框中选择Velocity Specification Method下拉列表中的"Magnitude,Normal to Boundary"，并保持Reference Frame为Absolute，在Velocity Magnitude[m/s]中输入1.5，单击 OK 按钮。

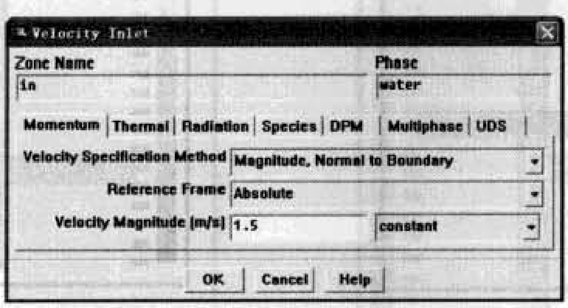


图12-15 水的速度入口设置

- 再次回到Boundary Conditions对话框，仍选择in，改变Phase为air，单击

Set... 按钮，在 Velocity Inlet 对话框中选择 Velocity Specification Method 下拉列表中的 Magnitude, Normal to Boundary，并保持 Reference Frame 为 Absolute，在 Velocity Magnitude[m/s]中输入 1.6；另外，由于速度入口气体的体积分数为 0.02，所以这里需要单击对话框中的 Multiphase 选项卡，在 Volume Fraction 中输入 0.02，单击 OK 按钮。

- 在左边的 Zone 栏选中 out-y，保持 Phase 为 mixture，单击 Set... 按钮，在图 12-16 所示 Outflow 对话框中的 Flow Rate Weighting 栏输入 0.38，单击 OK 按钮。

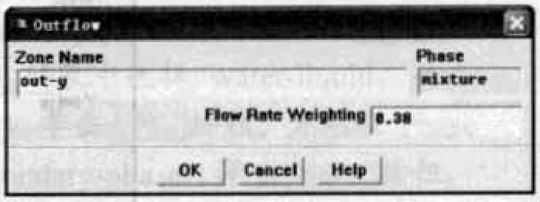


图12-16 出口设置

- 同理，在左边的 Zone 栏选中 out-s，保持 Phase 为 mixture，单击 Set... 按钮，在 Outflow 对话框中的 Flow Rate Weighting 中输入 0.62，单击 OK 按钮。

11. 执行 Solve→Control→Solution...命令，弹出 Solution Controls 对话框，选择 Pressure 的计算格式为 PRESTO!，保持其他默认设置，单击 OK 按钮。
12. 对流场进行初始化。执行 Solve→Initialize→Initialize...命令，在 Solution Initialization 对话框中选择 in，对进口初始化，顺序单击 Init 、Apply 、Close 按钮。初始化后，执行 Solve→Monitors→Residual...命令，在弹出的 Residual Monitors 对话框中选中 Plot，打开残差曲线图。FLUENT 默认各参数的收敛精度要求为 0.001，本例保持默认，单击 OK 按钮。
13. 完成上述步骤的设置后，执行 File→Write→Case...命令，将工程文件保存为 sl12-1-mixture.cas。
14. 执行 Solve→Iterate...命令，设置迭代步为 1000 步，单击 Iterate 按钮开始解算。迭代收敛后，执行 Display→Contours 命令，选择 Contours of 下拉列表中的 Pressure...和 Static Pressure，保持 Phase 列表中的 mixture，勾选 Options 栏中的 Filled 选项，单击 Display 按钮，得到如图 12-17 所示的压强分布云图。改变 Contours of 下拉列表中的 Velocity...和 Velocity Magnitude，单击 Display 按钮，可得速度分布云图，如图 12-18 所示。

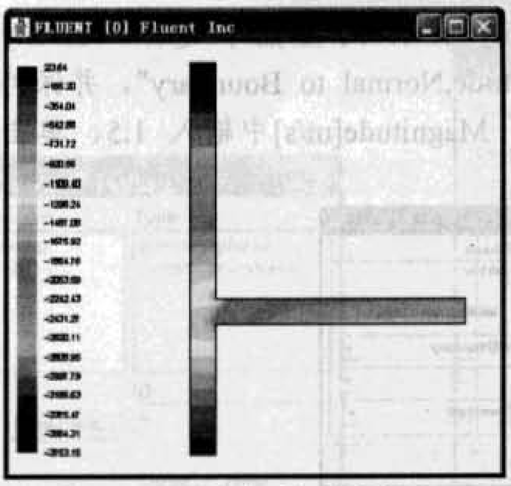


图12-17 压强分布云图（混合模型）

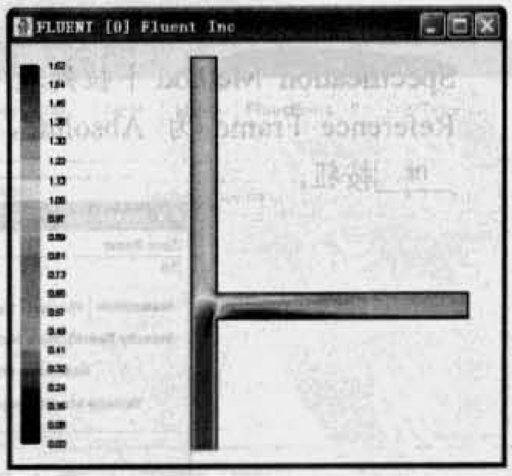


图12-18 速度分布云图（混合模型）

15. 改变 Contours of 下拉列表中的选项为 Phases...和 Volume fraction，并选择

Phase 列表中的 water，单击 Display 按钮，可得水的体积分数云图，如图 12-19 所示。

16. 改变 Phase 为 air，可得气体的体积分数云图，如图 12-20 所示。

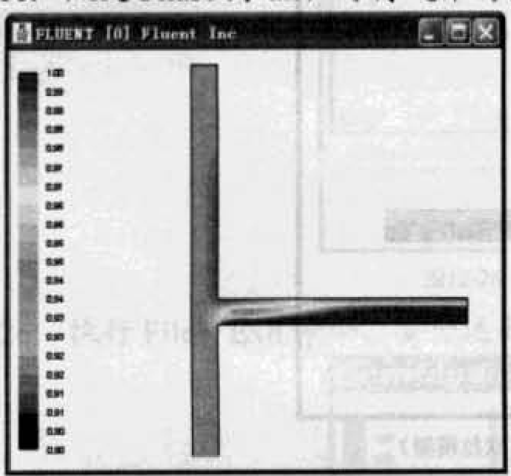


图12-19 水的体积分数（混合模型）

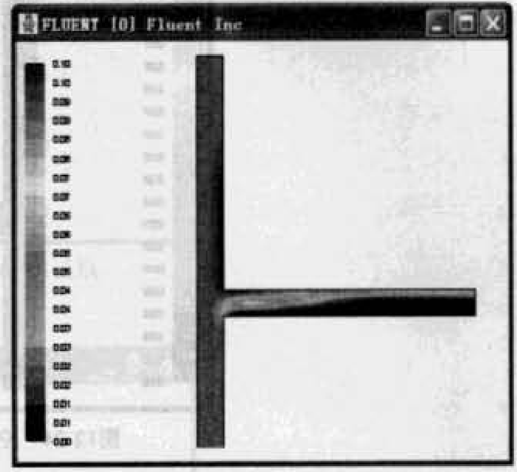


图12-20 空气的体积分数（混合模型）

17. 在换用欧拉模型计算前，先将混合模型的计算结果保存下来，执行 File→Write→Case...命令，将结果文件保存为 sl12-1-mixture.dat。

18. 下面选用欧拉模型进行多相流计算，不需要退出混合相计算的工程文件。执行 Define→Models→Multiphase...，在弹出的 Multiphase Model 对话框中选择 Eulerian，如图 12-21 所示，单击 OK 按钮。

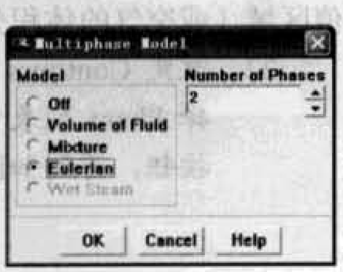


图12-21 欧拉模型设置

19. 重新对流场初始化。执行 Solve → Initialize → Initialize...命令，在 Solution Initialization 对话框中选择 in，对进口初始化，顺序单击 Init 、Apply 、Close 按钮。执行 File → Write → Case...命令，将工程文件保存为 sl12-1-euler.cas。

20. 执行 Solve→Iterate...命令，设置迭代步为 1000 步，单击 Iterate 按钮开始解算。

21. 迭代收敛后，执行 Display→Contours 命令，得到混合物的压强和气水两相的体积分数云图，如图 12-22 至图 12-24 所示。

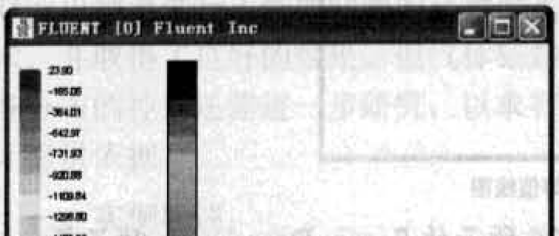


图12-22 压强分布图（欧拉模型）

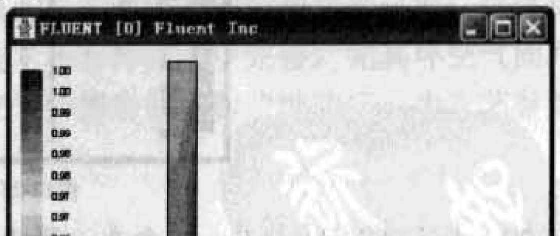


图12-23 水的体积分数（欧拉模型）

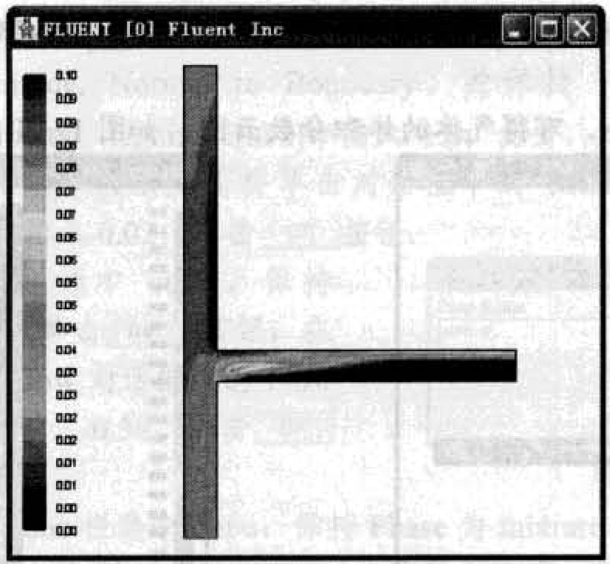


图12-24　空气的体积分数（欧拉模型）

从图中可以看出两种不同的多相流模型计算出来的结果之间存有一定的差距，尤其体现在体积分数云图上。

在混合流体刚进入横管时，欧拉模型的体积分数图中可以看到明显的水的体积分数极小值区域（或空气的体积分数极大值区域），而混合模型中的变化相对平缓。

22. 改变 Contours of 下拉列表中的选项为 Velocity...和 Velocity Magnitude，并选择 Phase 列表中的 water，取消勾选 Options 栏中的 Filled 选项，单击 Display 按钮，得到如图 12-25 所示的水的速度等值线图。

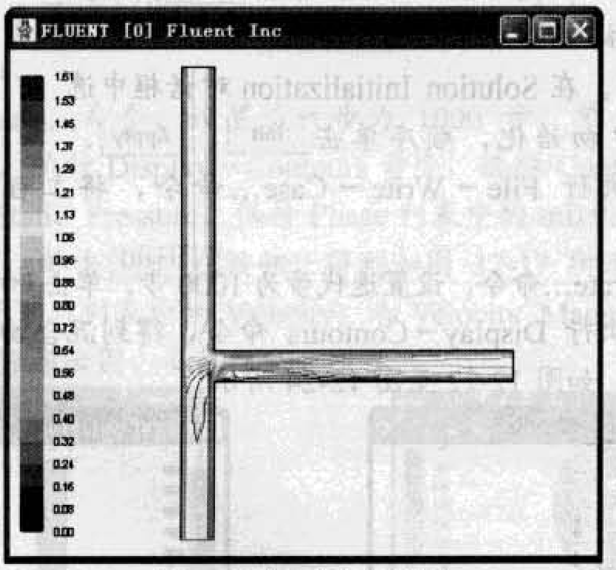


图12-25　水的速度等值线图

23. 执行 Display→Scene 命令，弹出如图 12-26 所示的 Scene Description 对话框，勾选 Scene Composition 栏中的 Overlays 选项，单击 Apply 按钮后单击 Close 按钮，关闭该对话框。这样就可以在原来的视图窗口中进行图形的叠加。
24. 执行 Display→Vectors 命令，保持 Vectors of 为 Velocity，选择 Phase 为 Water，其余保持默认，单击 Apply 按钮，就可以看到等值线与速度矢量图的叠加，如图 12-27 所示。
25. 执行 File→Write→Case...命令，将结果文件保存为 sl12-1-euler.dat.

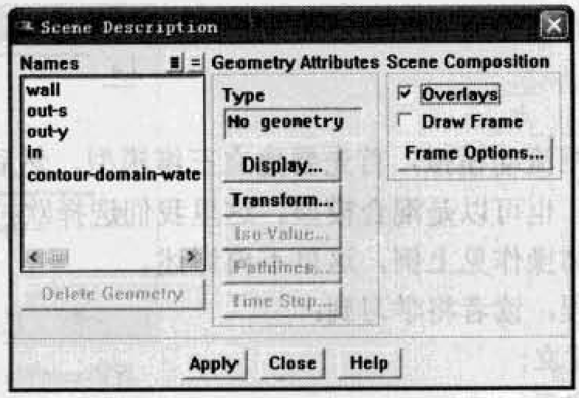


图12-26　Scene Description 对话框

26. 执行 File→Exit 命令，安全退出 FLUENT。

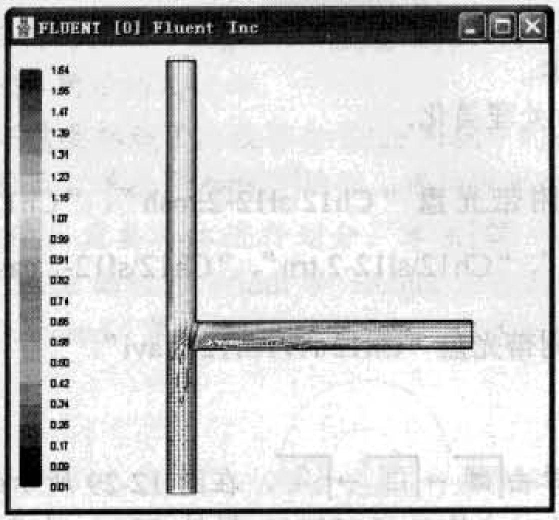


图12-27　等值线与矢量图的叠加

12.2　空气钻井环空气固两相流动模拟

空气钻井是以空气作循环介质携带岩屑的钻井技术，作为欠平衡钻井技术的一个分支，因其钻速快、成本低和对储层伤害小的显著特点备受人们关注。上世纪 90 年代，美国、加拿大以及欧洲一些国家开始了气体钻井技术的应用，并不断发展完善。我国在上世纪 60 年代对四川盆地进行了气体钻井的早期探索，近年来，很多油田的部分油气井已推广气体钻井技术，并取得了良好的效果。但气体钻井的整体技术还有待进一步完善，尤其环空气固两相流场分布的控制还需进一步研究，以求有效衡量空气的携岩能力和冲蚀效应，为工艺参数的设计提供依据。

一、实例概述

如图 12-28 所示，取井斜 5°的 10m 环空井段进行模拟分析，井眼 Φ316.5mm（环空外径），钻杆 Φ127mm（环空内径），套管与钻杆的绝对粗糙度 0.04678mm（环空内外壁的粗糙程度），岩屑的密度为 2600kg/m^3，比热为 1100J/(kg·K)，导热系数为 0.3W/(m·K)。气固两相混合物从下部入口进入，空气流速为 25m/s，岩屑流速为 15m/s，岩

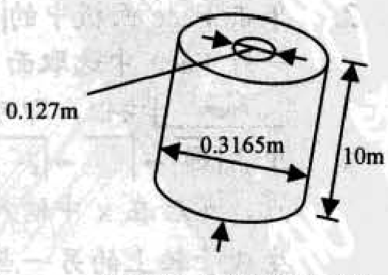


图12-28　环空模型示意图

屑的体积分数为 0.02，颗粒直径为 0.001m。

思路分析

本例为三维的气固两相流动模拟，首先要建立三维模型，然后在 FLUENT 中调用多相流模型，可以是欧拉模型，也可以是混合模型。这里我们选择欧拉模型，读者有兴趣可以用混合模型试验一下，其具体操作见上例，这里不再详述。

通过本实例的演示过程，读者将学习到：

- 井斜环空模型的建立；
- 多相欧拉模型的使用；
- 岩屑材料的定义；
- 壁面粗糙度的定义；
- 轴向剖面图的切割；
- 透视轮廓及图形后处理美化。

结果文件——参见附带光盘“Ch12\sl12-2.msh”、“Ch12\sl12-2.dbs”、“Ch12\sl12-2.jou”、“Ch12\sl12-2.trn”、“Ch12\sl12-2.cas”、“Ch12\sl12-2.dat”。

动画演示——参见附带光盘“Ch12\AVI\sl12-2.avi”。

二、模型建立

1. 启动 GAMBIT，单击 → → ，在图 12-29 所示的 Create Real Circular Face 面板的 Radius 中输入 0.15825，保持 Plane 为 XY（即建立在 *XOY* 面上），单击 Apply 按钮。然后在 Radius 中输入 0.0635，单击 Apply 按钮，得到如图 12-30 所示的几何面域。

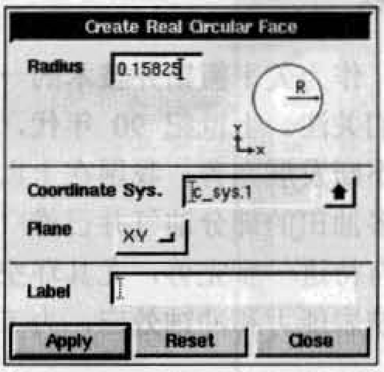


图12-29 Create Real Circular Face 面板

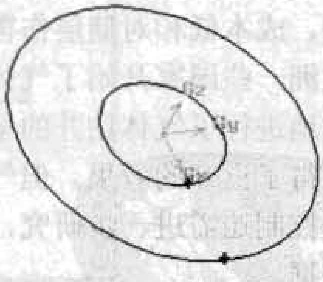


图12-30 几何面域

2. 单击 Face 面板中的 按钮，在图 12-31 所示的 Subtract Real Faces 面板的第一行 Face 中选取面 1（face.1），在第二行的 Faces 中选取面 2（face.2），单击 Apply 按钮，即可用面 2 去减面 1，得到环空的横截面。
3. 单击 → → ，默认 x、y、z 都为 0，单击 Apply 按钮，绘制出原点，然后在 x 中输入 0.87，z 中输入 9.96，默认 y 为 0，单击 Apply 按钮，生成管轴上的另一点。单击 → → ，在 Create Straight Edge 面板中将刚生成的两个端点相连，生成环空体的轴线，如图 12-32 所示。

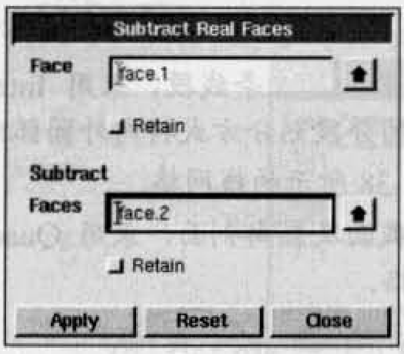


图12-31　Subtract Real Faces 面板

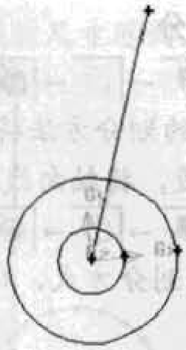


图12-32　绘制轴线

4. 接下来由该横截面生成整个环空几何体。单击→→，弹出如图 12-33 所示的 Sweep Faces 面板，在 Faces 中选取面 1，选择 Path 为 Edge，在 Edge 中选取刚绘制的轴线（edge.3），保持 Type 为 Rigid，单击 Apply 按钮，得到如图 12-34 所示的几何体。
5. 几何体生成后就不需要轴线了，故单击 Edge 面板中的按钮，在图 12-35 所示的面板中选中轴线，单击 Apply 按钮，将轴线删除。
6. 为了网格划分方便，需要将体进行划分。单击→→，在 Create Real Rectangular Face 面板的 Width 和 Height 中分别输入 20 和 10，并选择 Direction 为 ZX Centered，单击 Apply 按钮，生成一个用于剖分体的面。

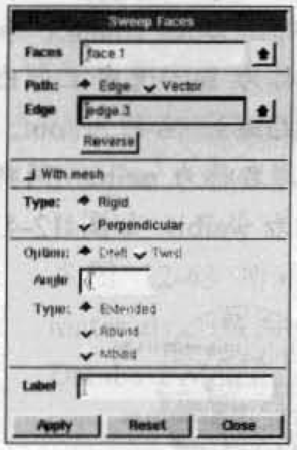


图12-33　Sweep Faces 面板

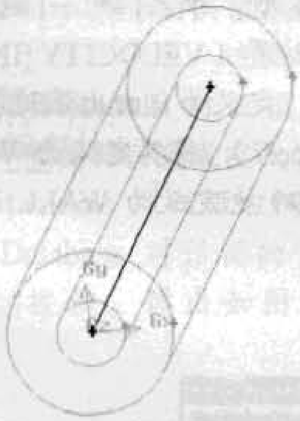


图12-34　几何模型体

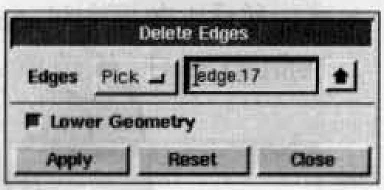


图12-35　Delete Edges 面板

7. 单击→→，在图 12-36 所示的 Split Volume 面板中选择 volume.1，选取 Split With 为 Faces（Real），然后选择 Faces 为刚生成的面 5，单击 Apply 按钮，得到如图 12-37 所示的几何体。

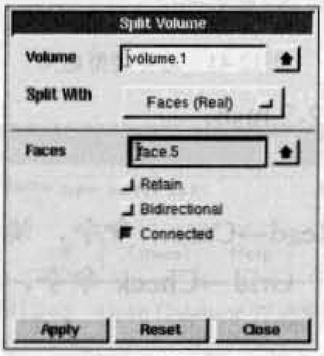


图12-36　Split Volume 面板

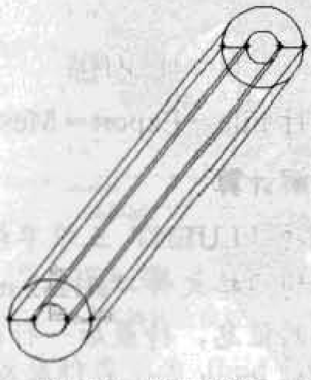


图12-37　分割成的体

三、网格划分

1. 单击[图标]→[图标]→[图标]，在 Edges 输入框中选择径向的四条线段，采用 Interval Count 的划分方法将其划分为 5 段。利用同样的分段划分方式将内外圆弧都分为 20 段，将轴向线段分为 50 段，得到如图 12-38 所示的线网格。
2. 单击[图标]→[图标]→[图标]，选择划分有线网格的横截面及轴向剖面，采用 Quad 和 Map 的划分方式，得到如图 12-39 所示的面网格。

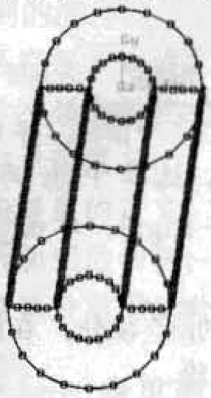


图12-38　线网格

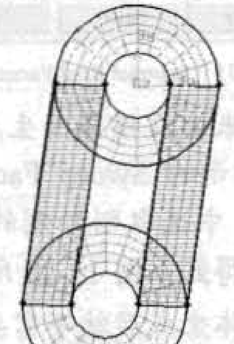


图12-39　面网格

3. 单击[图标]→[图标]→[图标]，选中分割的两个体（volume.1 和 volume.2），采用 Hex 和 Map 的划分方式进行体网格划分，得到如图 12-40 所示的体网格。
4. 网格划分好后定义边界类型。单击[图标]→[图标]，选中下部进口面（face.1 和 face.6），定义为速度入口边界（VELOCITY_INLET），名称为 in；选中上部出口面（face.4 和 face.10），定义为自由出流边界（OUTFLOW），名称为 out；选择内壁面（face.3 和 face.7），将其定义为 WALL 边界，名称为 neibi；同样将外壁面（face.2 和 face.9）也定义为 WALL 边界，名称为 waibi，如图 12-41 所示。

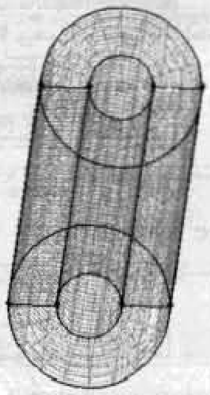


图12-40　体网格

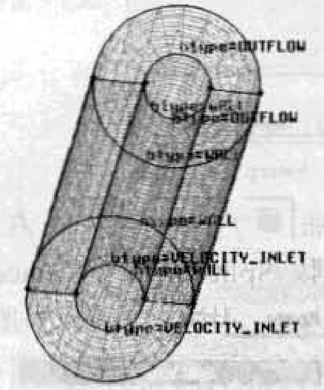


图12-41　边界类型定义

5. 执行 File→Export→Mesh 命令，将网格输出为 sl12-2.msh。

四、求解计算

1. 启动 FLUENT 三维单精度计算器，执行 File→Read→Case...命令，读入划分好的网格文件“sl12-2.msh”。网格读入之后，执行 Grid→Check 命令，检查网格的信息，待最后一行出现“Done”语句。
2. 执行 Grid→Scale...命令，弹出 Scale Grid 对话框，本例不需要重新定义网格

的尺寸，从图 12-42 所示的对话框中可以看到计算区域的尺寸范围。

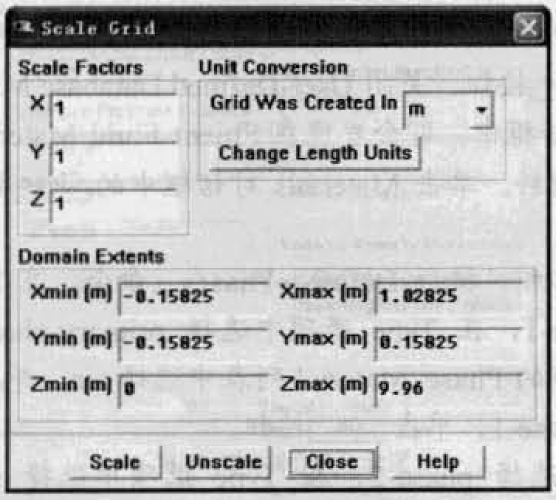


图12-42 Scale Grid 对话框

3. 定义本例所用到的模型。执行 Define→Models→Solver...命令，弹出 Solver 对话框，保持默认设置，单击 OK 按钮。执行 Define→Models→Multiphase...命令，在弹出的 Multiphase Model 对话框中选择 Eulerian，单击 OK 按钮，关闭该对话框。最后还需启用湍流模型，执行 Define→Models →Viscous...命令，弹出 Viscous Model 对话框，在 Model 选项中选择 k-epsilon[2 eqn]，在 k-epsilon Model 选项下选择 Standard，保留其他默认设置，单击 OK 按钮。
4. 由于气体在井下的密度要高于标准密度，这里定义其为 10kg/m^3，故需执行 Define→Materials 命令，在 Materials 对话框中选中 air，改变其密度为 10kg/m^3，然后单击 Change/Create 按钮，完成空气密度改变的定义。
5. 接着定义岩屑材料，单击 Materials 对话框右侧的 User-Defined Database... 按钮，在图 12-43 所示的 Open Database 对话框的 Database Name 中输入 new materials，然后单击 Browse... 按钮，弹出如图 12-44 所示的 User-Defined Database Materials 对话框。

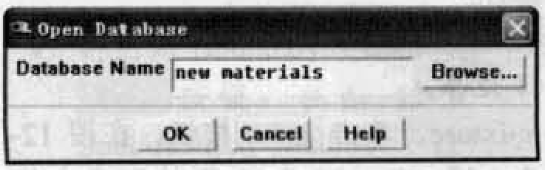


图12-43 Open Database 对话框

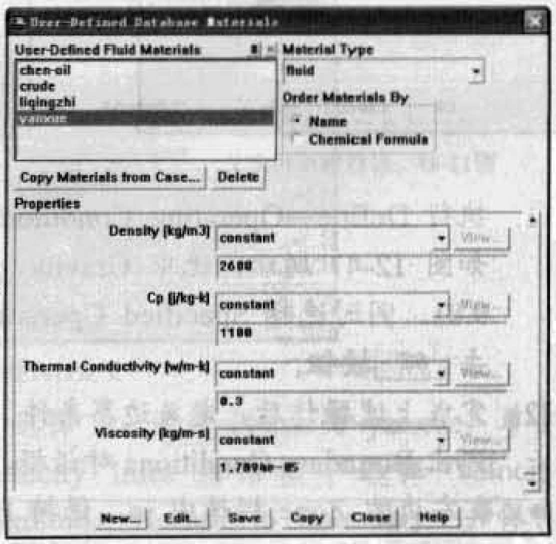


图12-44 岩屑物性参数

6. 在 User-Defined Database Materials 对话框中定义岩屑的类型为 fluid（多相流模型中的固相需要定义为流体类型），名称为 yanxue，物性参数如图中所示

（具体的物性参数定义可查看前面章节，这里不再详述），单击 Save 和 Copy 按钮，将定义好的岩屑保存在自定义材料数据库中，并导入到当前工程中进行计算。单击 Close 按钮，关闭 User-Defined Database Materials 对话框。

7. 回到 Materials 对话框中，即会发现在 Fluent Fluid Materials 下拉列表中存在了空气和岩屑两种材料。单击 Materials 对话框中的 Close 按钮，完成材料物性的定义。
8. 定义基本相和第二相。执行 Define→Phases...命令，在 Phases 对话框的 Phase 列表中选择 phase-1，在 Type 选项中选择 primary-phase，然后单击 Set... 按钮，在打开对话框的 Phase Material 列表中选择 air，并在 Name 文本框中输入 air 代替原来的 phase-1，单击 OK 按钮。
9. 在 Phase 列表中选择 phase-2，在 Type 选项中选择 secondary-phase，单击 Set... 按钮，在图 12-45 所示对话框的 Phase Material 列表中选择 air，并在 Name 文本框中输入 yanxue 代替原来的 phase-2，同时在 Properties 下的 Diameter[m]（直径）中输入岩屑颗粒直径 0.001，单击 OK 按钮。
10. 回到 Phases 对话框中，单击 Interaction... 按钮，弹出 Phase Intercation 对话框，如图 12-46 所示。与上例相同，选择 Drag Coefficient 中的 schiller-naumann，定义岩屑和空气之间使用 schiller-naumann 来计算相间阻力。单击 Slip 选项卡，此时相间的滑移速度公式采用的是默认的 manninen-et-al，保持其设置，单击 OK 按钮，关闭 Phase Intercation 对话框。

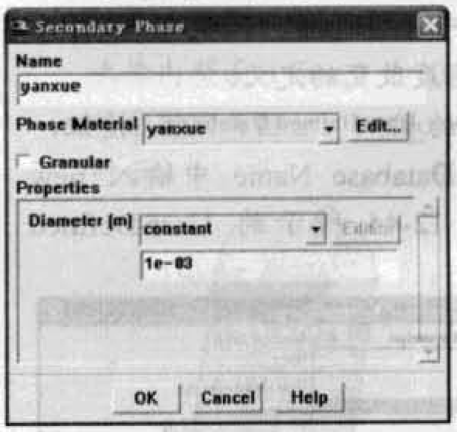


图12-45 岩屑颗粒相定义

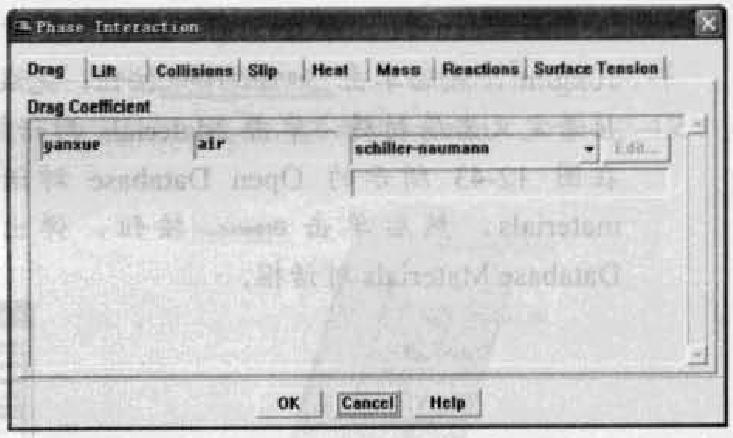


图12-46 相间作用的定义

11. 执行 Define→Operating Conditions 命令，打开 Operating Conditions 对话框。如图 12-47 所示，选中 Gravity，指定重力方向为 z 轴，在 Z[m/s2]右侧输入-9.81，同时选择 Specified Operating Density 项，并在文本框中输入 1.225，单击 OK 按钮。
12. 完成上述操作后，定义边界条件。执行 Define→Boundary Conditions...命令，弹出 Boundary Conditions 对话框，定义如下边界。

- 在左边的 Zone 栏选中 in，保持 Phase 为 mixture，单击 Set... 按钮，在图 12-48 所示的 Velocity Inlet 对话框中选择 Specification Method 下拉列表中的 Intensity and Hydraulic Diameter，在 Turbulent Intensity[%]中输入 10，在 Hydraulic Diameter[m]中输入 0.1895（环空外径减去内径），单击 OK 按钮。

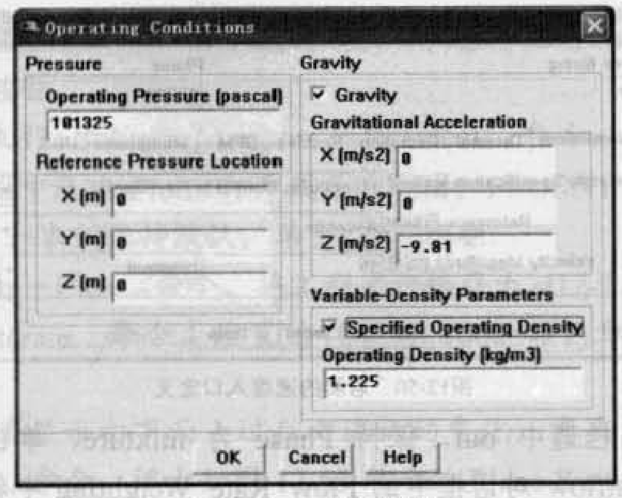


图12-47 操作环境设置

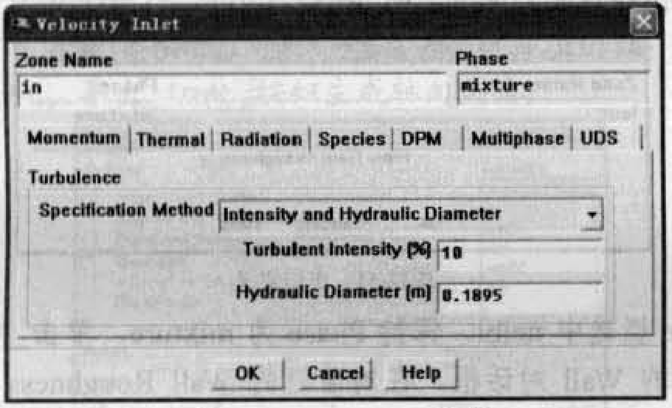


图12-48 Velocity Inlet对话框

- 回到 Boundary Conditions 对话框，仍选择 in，改变 Phase 为 air，单击 Set... 按钮，在图 12-49 所示的 Velocity Inlet 对话框中选择 Velocity Specification Method 下拉列表中的 Magnitude, Normal to Boundary，并保持 Reference Frame 为 Absolute，在 Velocity Magnitude[m/s]中输入 25，单击 OK 按钮。

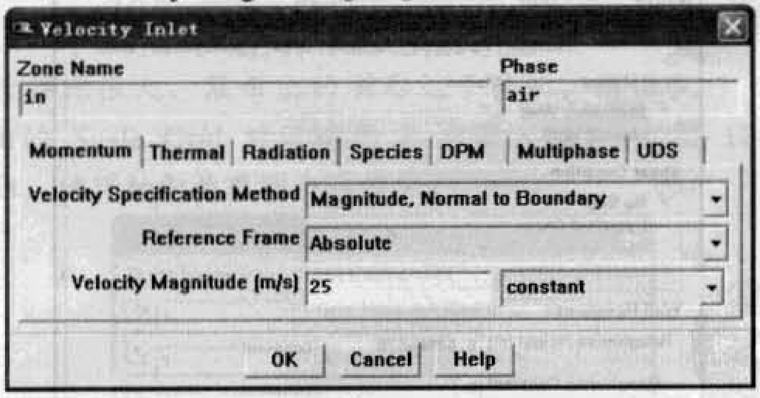


图12-49 空气的速度入口定义

- 再回到 Boundary Conditions 对话框，仍选择 in，改变 Phase 为 yanxue，单击 Set... 按钮，在图 12-50 所示的 Velocity Inlet 对话框中选择 Velocity Specification Method 下拉列表中的 Magnitude, Normal to Boundary，并保持 Reference Frame 为 Absolute，在 Velocity Magnitude[m/s]中输入 15；另外，由于速度入口岩屑的体积分数为 0.02，所以这里需要单击 Multiphase 选项卡，在 Volume Fraction 中输入 0.02，单击 OK 按钮。

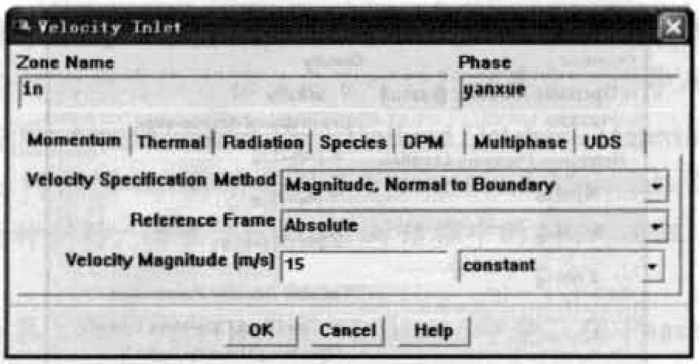


图12-50　岩屑的速度入口定义

- 在左边的 Zone 栏选中 out，保持 Phase 为 mixture，单击 Set... 按钮，在图 12-51 所示的 Outflow 对话框中的 Flow Rate Weighting 中输入 1，即表示进入的流体均从该出口流出，单击 OK 按钮。

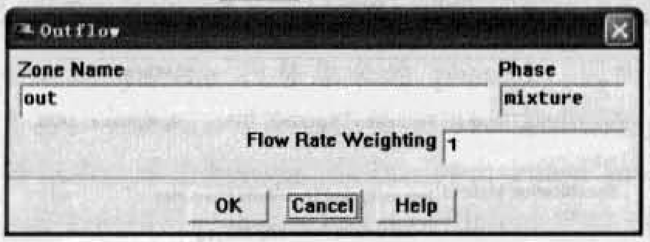


图12-51　出口定义

- 在左边的 Zone 栏选中 neibi，保持 Phase 为 mixture，单击 Set... 按钮，弹出如图 12-52 所示的 Wall 对话框，在对话框的 Wall Roughness 下方的 Roughness Height[m]中输入 0.00004678，保持 Roughness Constant 为 0.5，单击 OK 按钮。

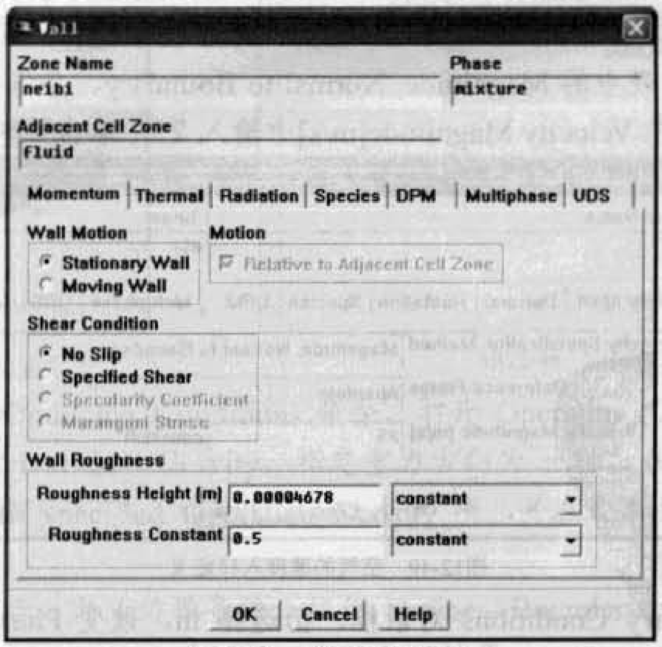


图12-52　壁面粗糙度定义

- 同理，定义 waibi（外壁面）的粗糙度也为 0.00004678。

13. 边界定义好后，执行 Solve→Control→Solution...命令，弹出 Solution Controls 对话框，保持其默认设置，单击 OK 按钮。
14. 接下来对流场进行初始化。执行 Solve→Initialize→Initialize...命令，在

Solution Initialization 对话框中选择 in，对进口初始化，顺序单击 Init 、Apply 、Close 按钮。

15. 初始化后，执行 Solve→Monitors→Residual...命令，在弹出的 Residual Monitors 对话框中选中 Plot，打开残差曲线图。FLUENT 默认各参数的收敛精度要求为 0.001，本例保持默认，单击 OK 按钮。
16. 执行 File→Write→Case...命令，将工程文件保存为 sl12-2.cas。
17. 执行 Solve→Iterate...命令，设置迭代步为 1000 步，单击 Iterate 按钮开始解算。
18. 迭代结束后，为显示由下而上过程中流场的变化，需要定义轴向剖面。执行 Surface→Plane...命令，弹出如图 12-53 所示的 Plane Surface 对话框。在 Points 下的三点坐标中分别输入 x0[m]、y0[m]、z0[m]为 0、0、0，x1[m]、y1[m]、z1[m]为 0、0、9.96，x2[m]、y2[m]、z2[m]为 1、0、9.96，并在 New Surface Name 中输入 z-h，单击 Create 按钮生成轴向剖面。

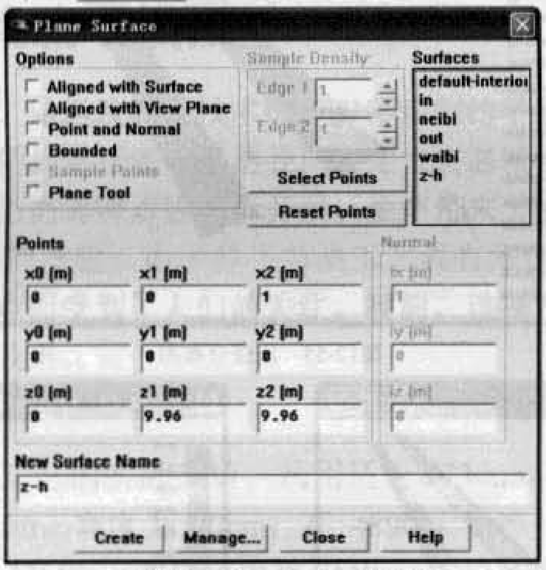


图12-53 Plane Surface 对话框

19. 因本题的长径比很大，显示出的图形过于狭长，所以执行 Grid→Scale...命令，在弹出的 Scale Grid 对话框的 Z 中输入 0.1，如图 12-54 所示，单击 Scale 按钮，使得轴向长度缩小到原来的 10%。

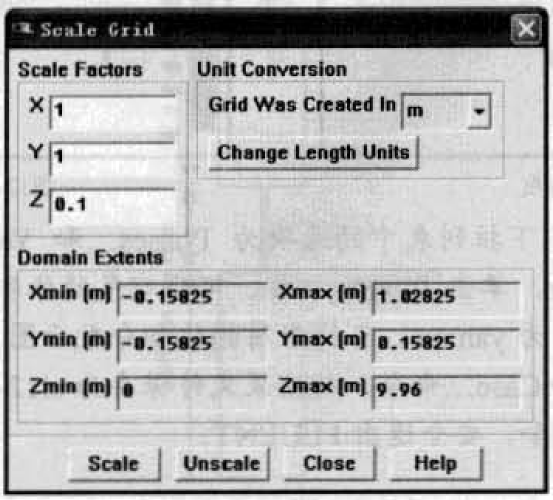


图12-54 改变轴向尺寸

20. 执行 Display→Contours 命令，在 Contours 对话框的 Surfaces 中选择已定义的轴向剖面 z-h，然后选择 Contours of 下拉列表中的 Pressure...和 Static Pressure，保持 Phase 列表中的 mixture，并勾选 Options 栏中的 Filled 选项，单击 Display 按钮，得到如图 12-55 所示的压强分布云图。改变 Contours of 下拉列表中的 Velocity...和 Velocity Magnitude，并选择 Phase 列表中的 air，单击 Display 按钮，可得空气的速度分布云图，如图 12-56 所示。改选 Phase 列表中的选项为 yanxue，单击 Display 按钮，可得岩屑的速度分布云图，如图 12-57 所示。

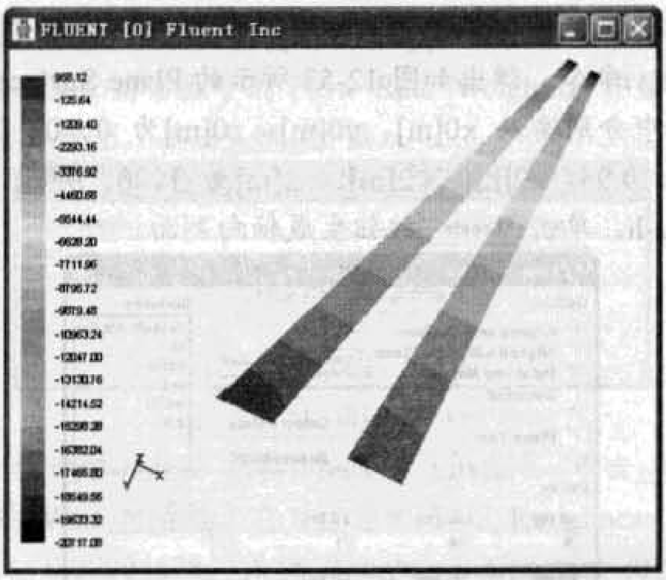


图12-55 压强分布图

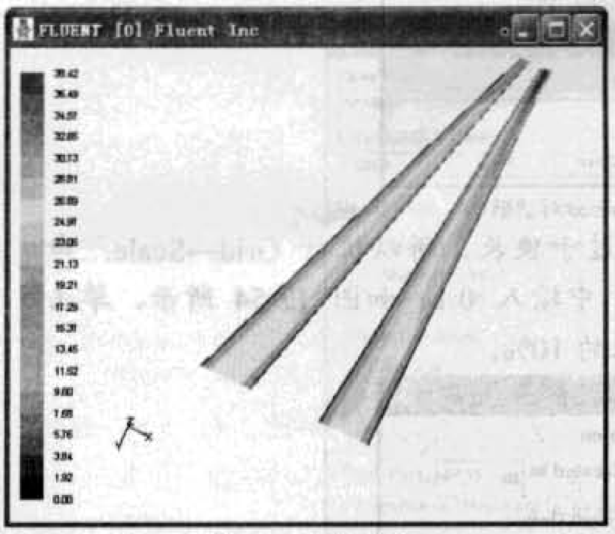


图12-56 空气速度

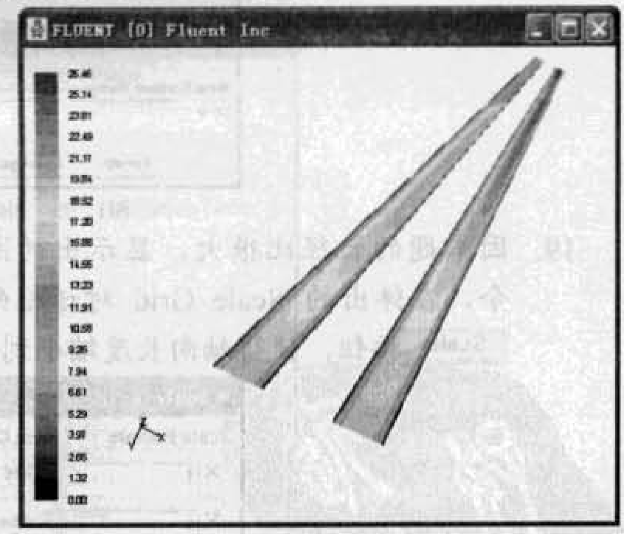


图12-57 岩屑速度分布

21. 改变 Contours of 下拉列表中的选项为 Phases...和 Volume fraction，并选择 Phase 列表中的 air，单击 Display 按钮，可得空气的体积分数云图，如图 12-58 所示。改变 Phase 为 yanxue，可得岩屑的体积分数云图，如图 12-59 所示。
22. 执行 File→Write→Case...命令，将结果文件保存为 sl12-2.dat。
23. 执行 File→Exit 命令，安全退出 FLUENT。

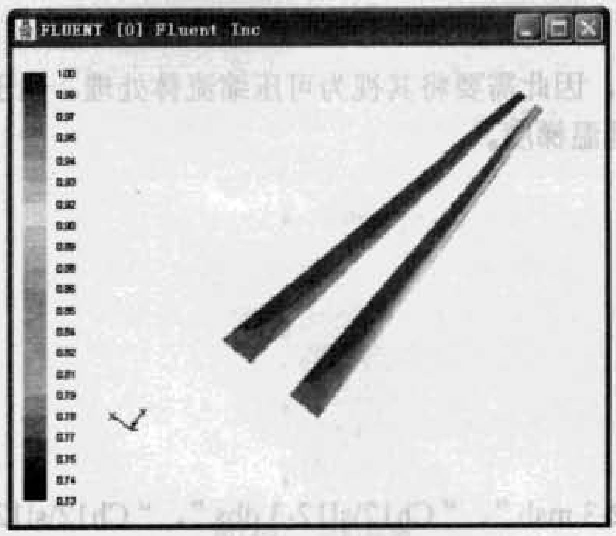


图12-58　空气体积分数

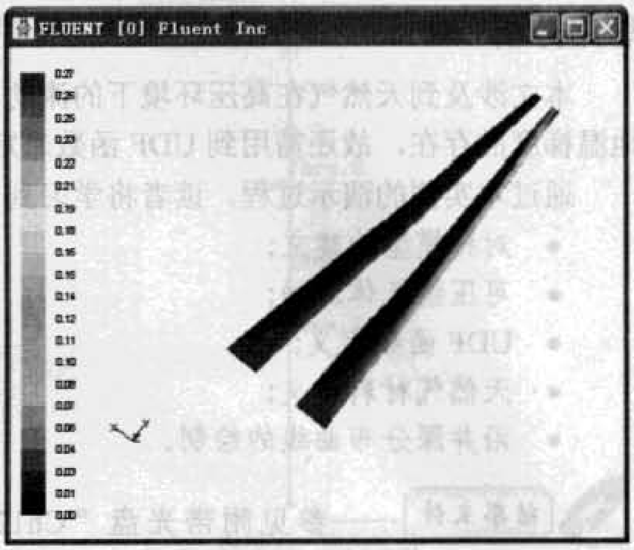


图12-59　岩屑体积分数

12.3　气井井下节流流场模拟

我国天然气勘探、开发、储运及利用技术的相对落后制约了国民经济的发展，大力发展清洁能源已成为本世纪重要的战略任务。虽然我国天然气资源较丰富，但分布广、气藏类型复杂、产出层系多、产层压力高等特点给实际开采、生产带来了困难，因此怎样科学地开采一直是困扰油气田技术人员的难题。由于井下节流工艺具有降低井口压力、避免水合物生成、提高气流携液能力等优点而受到了人们的关注。目前，该技术已在我国多个气田的多口气井中应用，取得了较好的效果。

一、实例概述

参考川渝地区井下节流工艺的实际参数，选用适于Φ73mm（$2^{7}/_{8}$"）油管的固定型井下节流器，节流嘴孔径为 3.1mm，高度为 20cm，在 4890m 生产井中，节流嘴的安装深度为 2000m；井底产层压力为 55.77MPa，井口压力为 8MPa；井口环境温度为 22.397℃，地温梯度为 1.936℃/100m；天然气相对密度为 0.6679，比热容为 2222J/(kg·K)，导热系数为 0.0332W/(m·K)，动力粘度为 1.087×10^{-5}Pa·s。几何模型简图如图 12-60 所示。

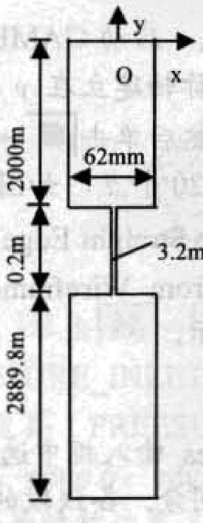


图12-60　井下节流几何模型示意图

思路分析

本文涉及到天然气在高压环境下的流动问题，因此需要将其视为可压缩流体处理。由于地温梯度的存在，故还需用到 UDF 函数来定义地温梯度。

通过本实例的演示过程，读者将学习到：

- 对称模型的建立；
- 可压缩气体流动；
- UDF 函数定义；
- 天然气材料定义；
- 沿井深分布曲线的绘制。

结果文件——参见附带光盘“Ch12\sl12-3.msh”、“Ch12\sl12-3.dbs”、“Ch12\sl12-3.jou”、“Ch12\sl12-3.trn”、“Ch12\sl12-3.cas”、“Ch12\sl12-3.dat”、“Ch12\udf.c”。

动画演示——参见附带光盘“Ch12\AVI\sl12-3.avi”。

二、模型建立

由于 GAMBIT 中长宽比太大的情况下生成的面网格会出现很大的歪斜度，且考虑到节流嘴处网格的细化，故将模型划分成 8 个面域，其位置及长度如图 12-61 所示。

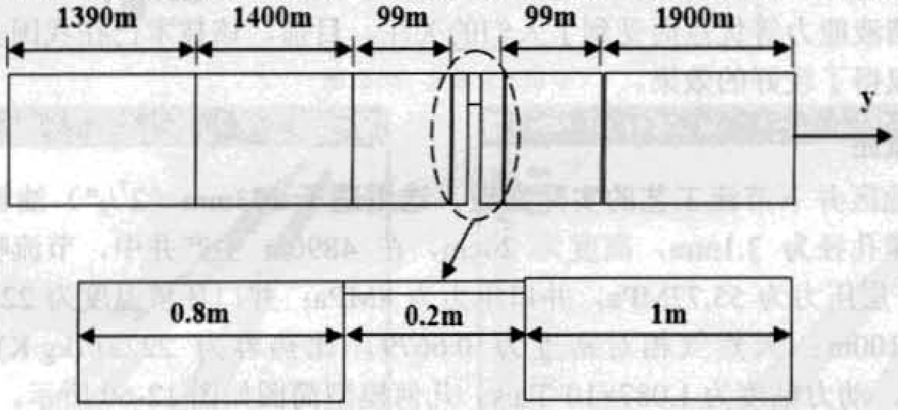


图12-61　分区尺寸

1. 双击 GAMBIT 的桌面快捷方式，启动 GAMBIT。
2. 我们只建立右侧一半模型，对称轴建立在 y 轴上，首先参照图 12-61，将模型中所有端点的坐标计算出来，然后单击 → → ，在 Create Real Vertex 面板中完成模型点的绘制，共 20 个点，如图 12-62 所示。
3. 单击 → → ，在 Create Straight Edge 面板中将点连接成线，再单击 → → ，在 Create Face from Wireframe 面板中将线围成面，形成几何模型的 8 个面域，如图 12-63 所示。

三、网格划分

1. 单击 → → ，在 Edges 输入框中选择需要划分的线段，采用 Interval Count 的划分方法进行线网格划分。各线段的网格划分段数如图 12-64 所示。



图12-62　点的绘制

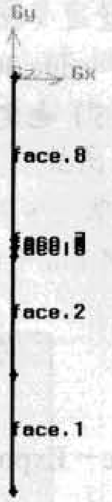


图12-63　面的绘制

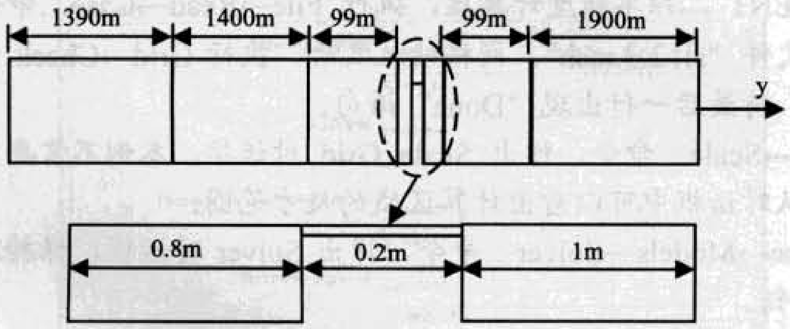


图12-64　线网格划分段数

2. 单击 → → ，选择所有的面，采用 Quad 和 Map 的划分方式，得到如图 12-65 所示的面网格，节流嘴处网格局部放大图如图 12-66 所示。

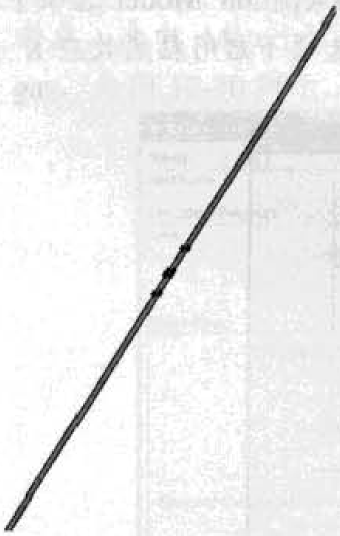


图12-65　面网格

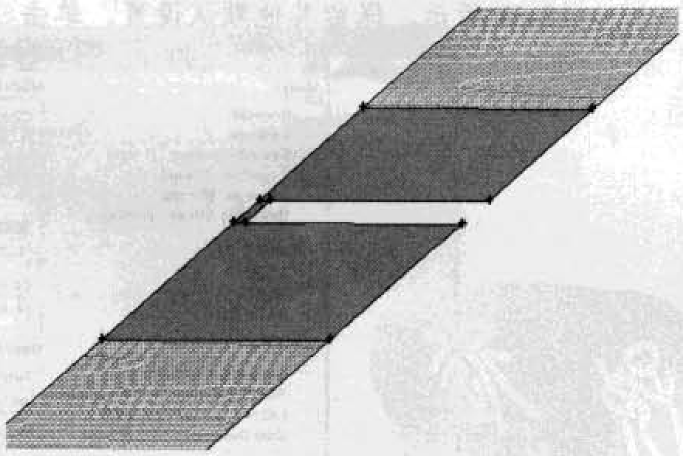


图12-66　节流嘴处面网格的局部放大

3. 网格划分好后定义边界类型，单击 → ，选中下部进口边（edge.28），定义为压力入口边界（PREESURE_INLET），名称为 inlet；选中上部出口边（edge.1），定义为压力出口边界（PREESURE_OUTLET），名称为 outlet；选择 y 轴上的对称边（edge.2、edge.6、edge.10、edge.14、edge.17、edge.23、edge.26、edge.29），将其定义为对称边界（SYMMETRY），名称为 symm；将

右侧井壁边（edge.4、edge.7、edge.9、edge.11、edge.13、edge.18、edge.24、edge.27、edge.30）定义为壁面边界（WALL），名称为 wall；将节流嘴右侧边（edge.15）也定义为壁面边界（WALL），名称为 choke wall，如图 12-67 所示。

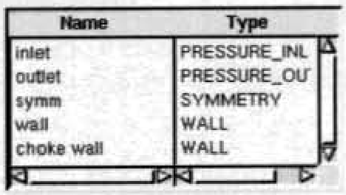


图12-67 边界类型定义

4. 执行 File→Export→Mesh 命令，将网格输出为 sl12-3.msh。

四、求解计算

1. 启动 FLUENT 二维单精度计算器，执行 File→Read→Case...命令，读入划分好的网格文件“sl12-3.msh”。网格读入之后，执行 Grid→Check 命令，检查网格的信息，待最后一行出现“Done”语句。
2. 执行 Grid→Scale...命令，弹出 Scale Grid 对话框，本例不需要重新定义网格的尺寸，从对话框中可以看出计算区域的尺寸范围。
3. 执行 Define→Models→Solver...命令，弹出 Solver 对话框，保持默认设置，单击 OK 按钮。
4. 执行 Define→Models→Energy 命令，勾选 Energy 对话框上的 Energy Equation 选项，以激活传热计算。
5. 启用湍流模型。执行 Define→Models→Viscous...命令，弹出 Viscous Model 对话框，在 Model 选项中选择 k-epsilon[2 eqn]，在 k-epsilon Model 选项下选择 Realizable，勾选 Options 栏中的 Viscous Heating 选项（启用粘热效应），如图 12-68 所示，保留其他默认设置，单击 OK 按钮。

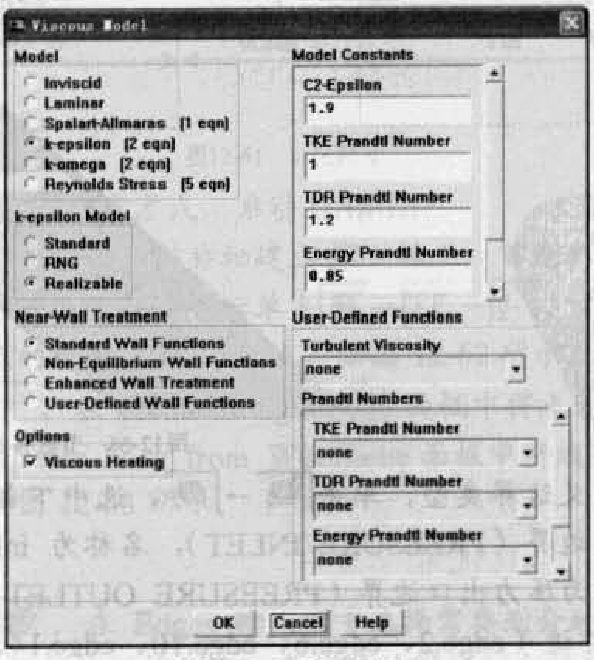


图12-68 湍流模型选择

6. 因天然气中的主要成分为甲烷，故从 FLUENT 自带数据库中将甲烷调用出来。执行 Define→Materials 命令，单击 Materials 对话框右侧的 Fluent Database... 按钮，在弹出的 Fluent Database Materials 对话框中，利用滚动条选择 Fluent Fluid Materials 列表中的 methane[ch4]，见图 12-69，单击 Copy 按钮，即将数据库中的材料——甲烷拷贝到当前工程中。单击 Close 按钮关闭该对话框。回到 Materials 对话框，即会发现在 Fluent Fluid Materials 下拉列表中存在了甲烷和空气两种材料。

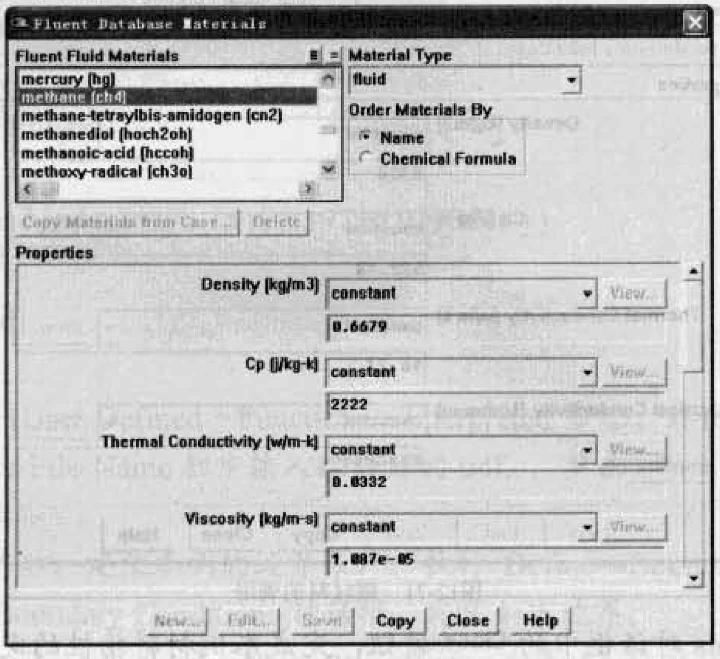


图12-69 甲烷材料的调用

7. 由于天然气在高压环境下是可压缩的，因此本例将其流动当作可压缩流动来考虑，选中 Materials 对话框中的 methane，改变其密度（Density）为 ideal-gas，如图 12-70 所示。

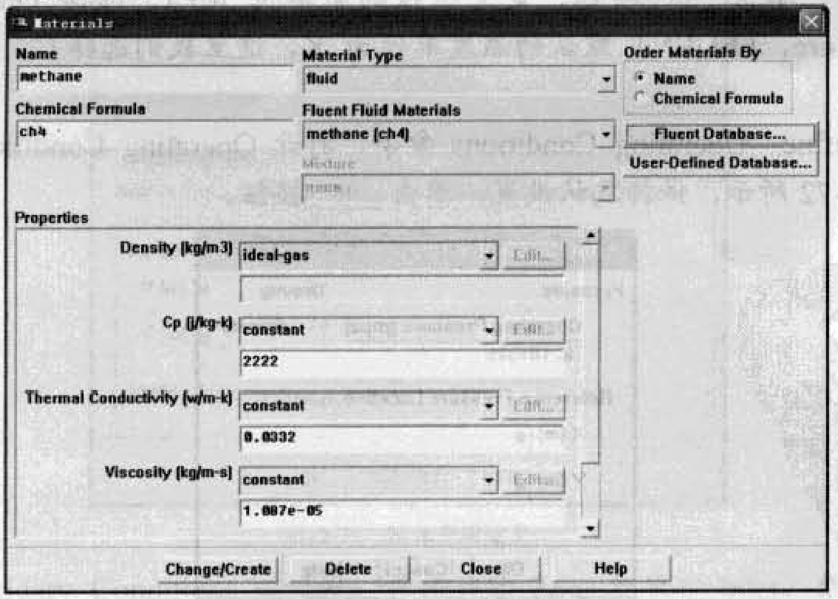


图12-70 改变甲烷的密度

8. 单击 Materials 对话框右侧的 Fluent Database... 按钮，在弹出的 Fluent

Database Materials 对话框中，将 Material Type 改为 solid，利用滚动条选择 Fluent Solid Materials 列表中的 steel，如图 12-71 所示，单击 Copy 按钮，即将数据库中的材料——钢拷贝到当前工程中。单击 Close 按钮关闭该对话框。

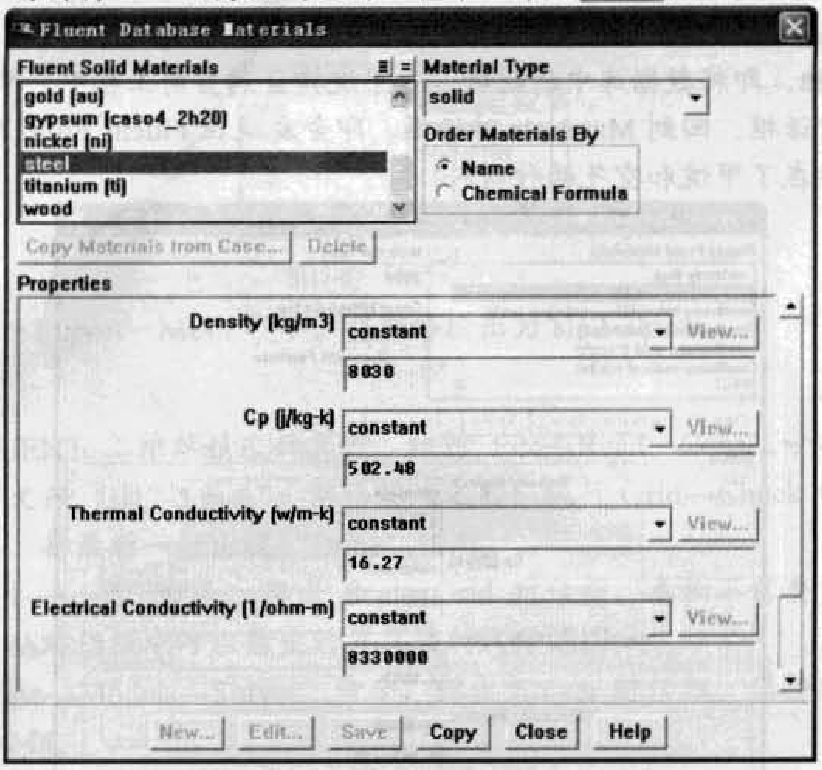


图12-71　钢材料的调用

9. 单击 Materials 对话框中的 Close 按钮，完成本例材料物性的定义。
10. 执行 Define→Units 命令，弹出 Set Units 对话框，选择 Quantities 中的 pressure，在 Units 可以看到目前工程中关于压强的单位。单击 New... 按钮，在弹出的 Define Unit 对话框中的 Unit 中输入名称 mpa，在 Factor 中输入 1000000，单击 OK 按钮，定义压强的新单位 MPa。选择 Quantities 中的 temperature，FLUENT 默认的温度单位为 K，这里我们选择℃，单击 OK 按钮。
11. 执行 Define→Operating Conditions 命令，打开 Operating Conditions 对话框。如图 12-72 所示，保持默认设置，单击 OK 按钮。

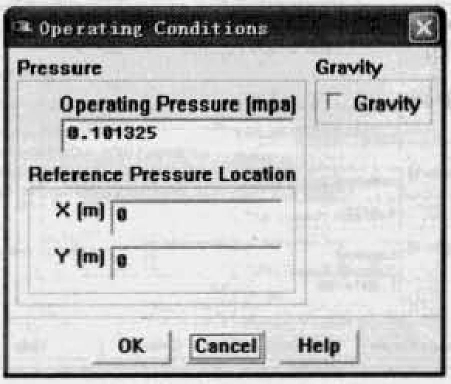


图12-72　操作环境设置

12. 本例要用到 UDF 来定义井壁的地温梯度函数，因此打开 VC++程序编辑器，

输入下面的 UDF 程序，保存为“udf.c”文件，并放置在工作目录下。

```
#include "udf.h"
DEFINE_PROFILE(WALL_inlet,thread,index)
{
face_t f;
real x[ND_ND];
real y;
begin_f_loop(f,thread)
{
F_CENTROID(x,f,thread);
y=x[1];
F_PROFILE(f,thread,index)=273.15+22.397+0.01936*(-y);
}
end_f_loop(f,thread)
}
```

13. 执行 Define→User-Defined→Functions→Interpreted 命令，弹出 UDF 解释对话框，在 Source File Name 栏中输入编写好的 udf.c，单击 Interpret 按钮，将地温梯度函数调入。
14. 完成上述操作后，定义本例的边界条件。执行 Define→Boundary Conditions...命令，弹出 Boundary Conditions 对话框，定义如下边界。

- 在左边的 Zone 栏选中 fluid，单击 Set... 按钮，在图 12-73 所示的 Fluid 对话框中选择 Material Name 下拉列表中的 methane，单击 OK 按钮。

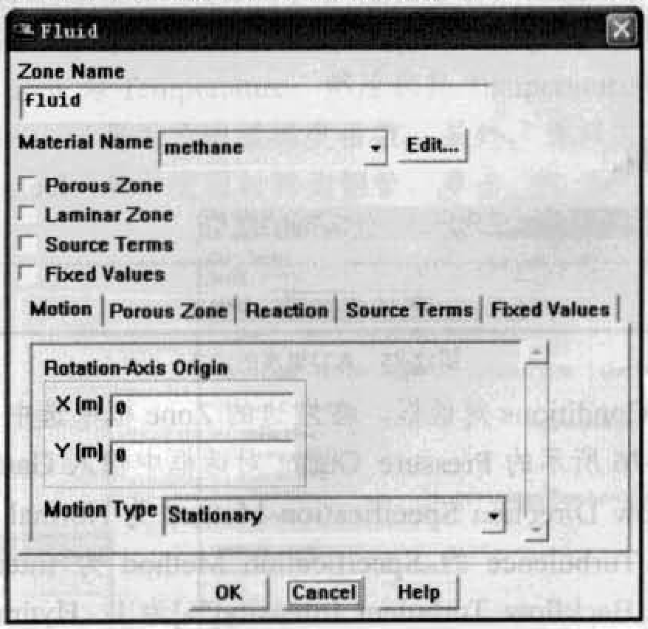


图12-73 流体介质定义

- 回到 Boundary Conditions 对话框，在左边的 Zone 栏选中 inlet，单击 Set... 按钮，在图 12-74 所示的 Pressure Inlet 对话框中输入 Gauge Total Pressure[mpa]为 55.77，Supersonic/Initial Gauge Pressure[mpa] 为 55.76，选择 Direction

Specification Method 为 Normal to Boundary。选择 Turbulence 的 Specification Method 为 Intensity and Hydraulic Diameter（紊动强度与水力直径），输入 Turbulent Intensity[%]为 1，Hydraulic Diameter[m]为 0.062。最后选择 Thermal 选项卡，在 Total Temperature[c]中输入 117，如图 12-75 所示，单击 OK 按钮。

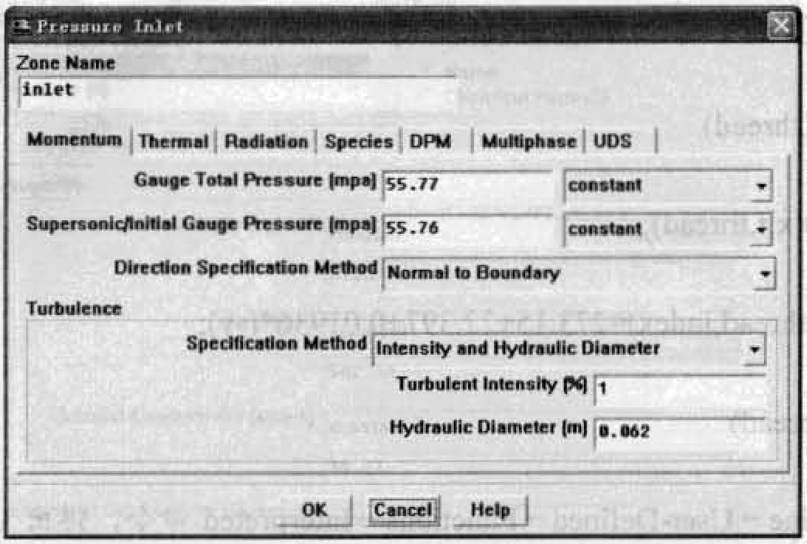


图12-74　压强入口定义

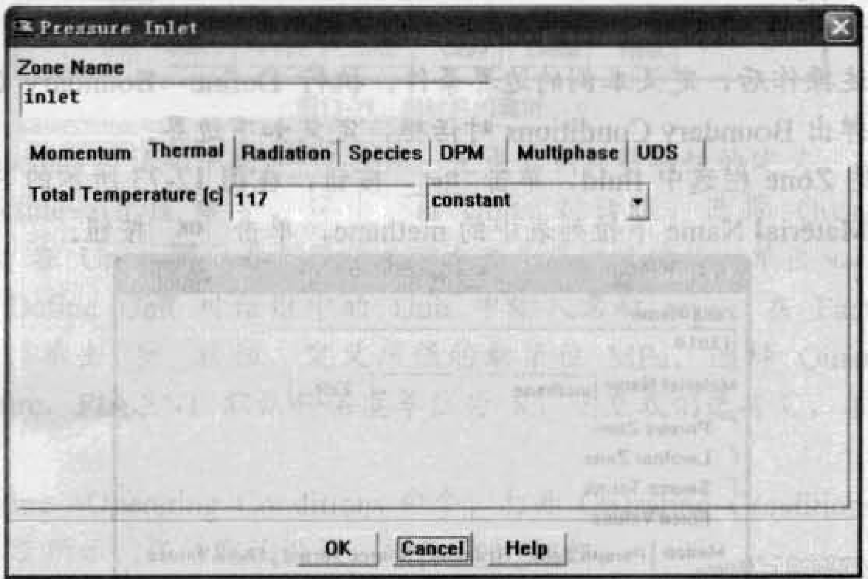


图12-75　入口温度的定义

- 回到 Boundary Conditions 对话框，在左边的 Zone 框中选中 outlet，单击 Set... 按钮，在图 12-76 所示的 Pressure Outlet 对话框中输入 Gauge Pressure[mpa]为 8，选择 Backflow Direction Specification Method 为 Normal to Boundary。然后选择 Backflow Turbulence 的 Specification Method 为 Intensity and Hydraulic Diameter，输入 Backflow Turbulent Intensity[%]为 1，Hydraulic Diameter[m]为 0.062。最后选择 Thermal 选项卡，在其中的 Backflow Total Temperature[c]中输入 22.397，如图 12-77 所示，单击 OK 按钮。
- 回到 Boundary Conditions 对话框，在左边的 Zone 栏选中 symm，单击 Set... 按钮，弹出如图 12-78 所示的对称边界定义对话框，直接单击 OK 按钮。

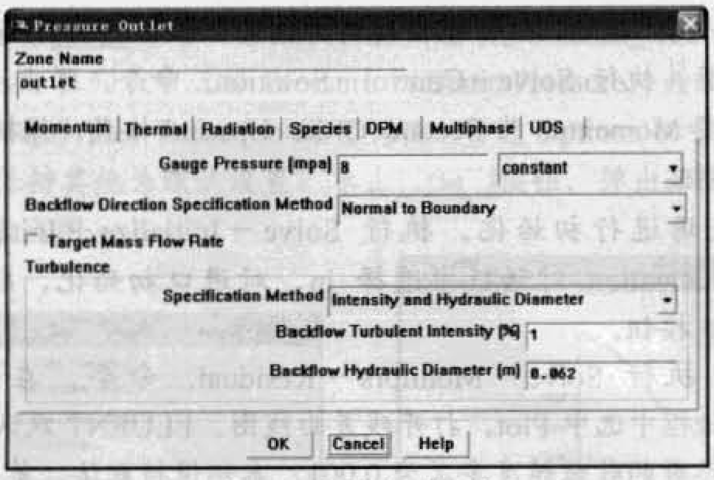


图12-76 压强出口的定义

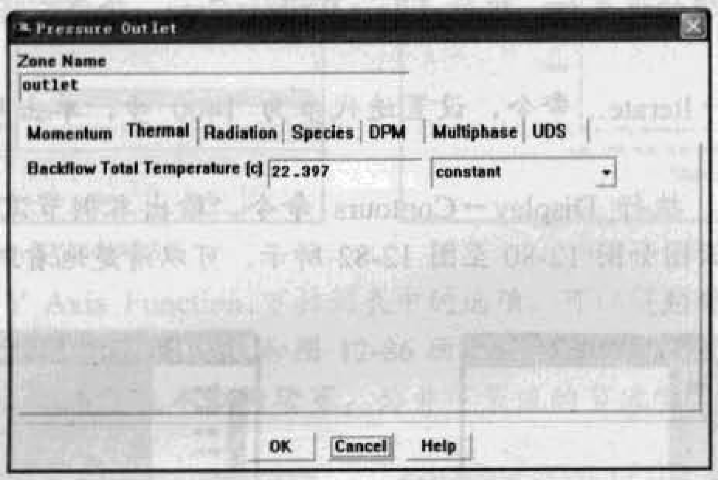


图12-77 出口温度的定义

- 回到 Boundary Conditions 对话框，在左边的 Zone 框中选中 wall，单击 Set... 按钮，弹出如图 12-79 所示的 Wall 对话框，选中 Thermal 选项卡，选择 Thermal Conditions 为 Temperature，然后选择 Temperature[c]右侧下拉列表中的 udf WALL_inlet，即调用了地温梯度函数。另外，选择左下角 Material Name 下拉列表中的 steel，表示壁面材料为钢管，单击 OK 按钮。

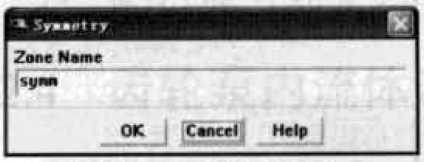


图12-78 对称边界定义

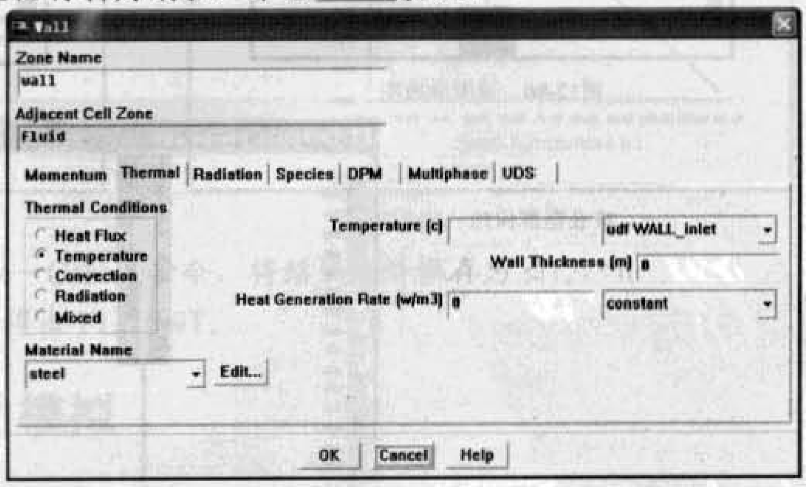


图12-79 壁面边界设置

- 再次回到 Boundary Conditions 对话框，在左边的 Zone 栏选中 choke_wall，单击 Set... 按钮，与上面井壁边界定义一样，选中 Thermal 选项卡，调入地温梯

度函数 udf WALL_inlet，选择壁面材料为钢管，单击 OK 按钮。

15. 边界定义好后，执行 Solve→Control→Solution...命令，弹出 Solution Controls 对话框，改变 Momentun 为 Second Order Upwind 格式，保持其他默认设置，单击 OK 按钮。
16. 接下来对流场进行初始化。执行 Solve→Initialize→Initialize...命令，在 Solution Initialization 对话框中选择 in，对进口初始化，顺序单击 Init 、Apply 、Close 按钮。
17. 初始化后，执行 Solve→Monitors→Residual...命令，在弹出的 Residual Monitors 对话框中选中 Plot，打开残差曲线图。FLUENT 默认除 energy 为 10^{-6} 外，其他各参数的收敛精度要求为 0.001，本例保持默认，单击 OK 按钮。
18. 完成上述步骤的设置后，执行 File→Write→Case...命令，将工程文件保存为 sl12-3.cas。
19. 执行 Solve→Iterate...命令，设置迭代步为 1400 步，单击 Iterate 按钮开始解算。
20. 迭代结束后，执行 Display→Contours 命令，输出本例节流嘴处的速度、温度、马赫数云图如图 12-80 至图 12-82 所示。可以清楚地看到节流后速度的增大和温度的降低。



图12-80 速度分布图

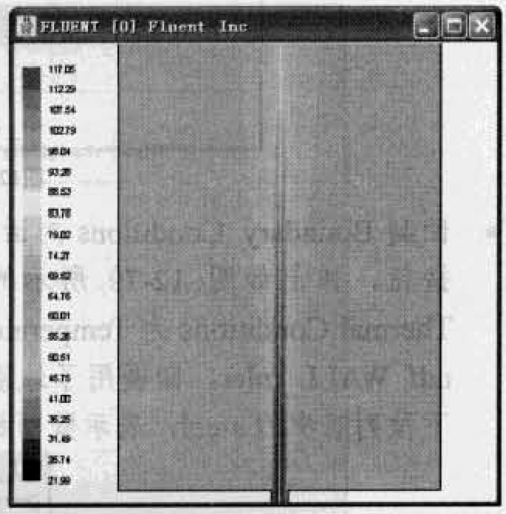


图12-81 温度分布



图12-82 马赫数分布

21. 执行 Plot→XY Plot...命令，在图 12-83 所示的 Solution XY Plot 对话框的 Y Axis Function 下拉列表中选择 Pressure 和 Static Pressure，并选择 Surfaces 列表中的 symm，选择 Plot Direction 的 Y 为 1，勾选 Options 栏中的 Position on Y Axis 选项，保持其他为默认设置，单击 Plot 按钮，弹出如图 12-84 所示的轴向压强分布散点图。

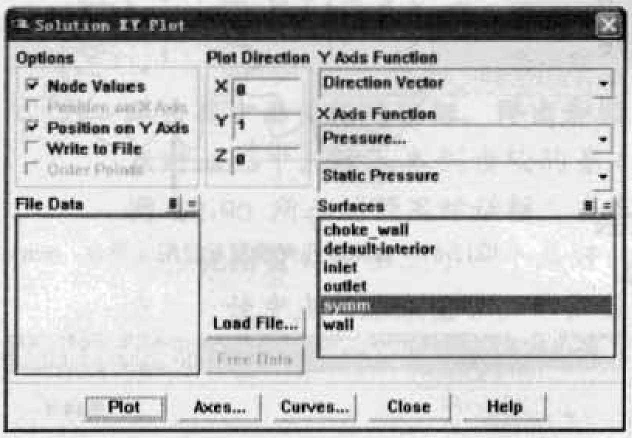


图12-83　Solution XY Plot 对话框

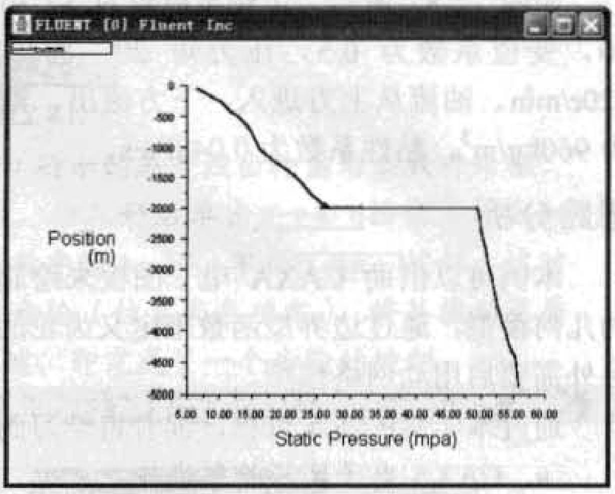


图12-84　轴向压强分布

22. 同理，改变 Y Axis Function 下拉列表中的选项，可以得到对应的轴向速度和温度的分布曲线，如图 12-85 和图 12-86 所示。这些曲线图可以帮助我们分析节流嘴处是否容易发生水合物堵塞，为井下节流的节流嘴安装及设计提供一定的指导。

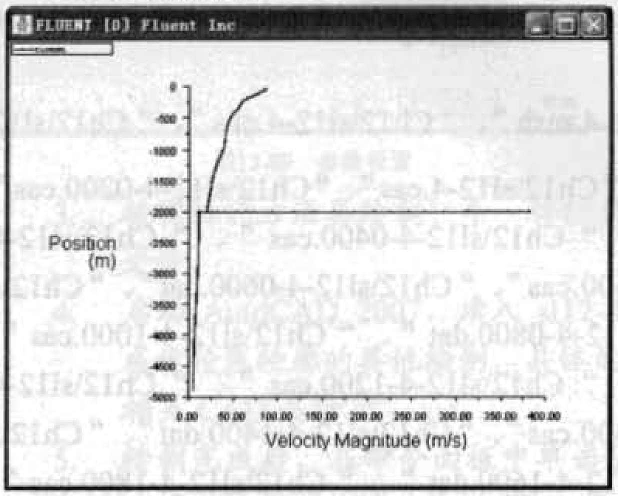


图12-85　轴向速度分布

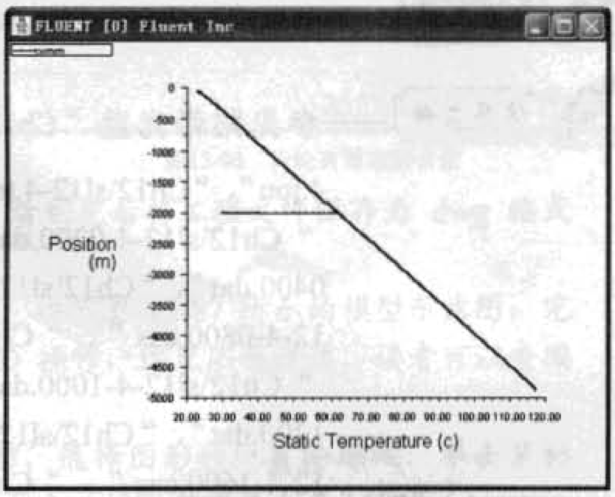


图12-86　轴向温度分布

23. 分析完后，执行 File→Write→Case...命令，将结果文件保存为 sl12-3.dat。

24. 执行 File→Exit 命令，安全退出 FLUENT。

12.4　齿轮泵内流体流动模拟

齿轮泵是容积泵的一种，由两个齿轮、泵体与前后盖组成两个封闭空间，当齿轮转动时，齿轮脱开侧的空间的体积从小变大，形成真空，将液体吸入，齿轮啮合侧的空间的体积从大变小，而将液体挤入管路中去，其吸入腔与排出腔是靠两个齿轮的啮合线来隔开的。齿

轮泵适用于输送不含固体颗粒和纤维，无腐蚀性的润滑油或性质类似润滑油的其他液体，以及用于液压传动系统。大流量齿轮油泵现主要用于油田、油库、港口、码头、船舶等大流量输油、卸油，起到了很大功效。

一、实例概述

如图 12-87 所示，齿轮泵模数为 3，齿轮数为 10，变位系数为 0.5，压力角 20，齿轮转速为 420r/min。油流从上方进入，下方流出。油的密度为 960kg/m^3，粘性系数为 0.048Pa·s。

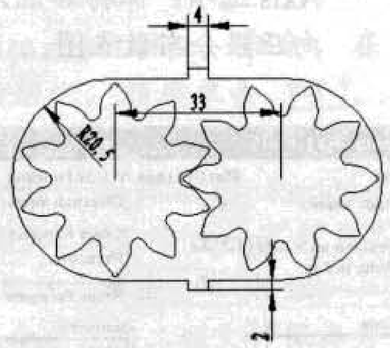


图12-87 齿轮泵几何模型示意图（单位：mm）

思路分析

本例可以借助 CAXA 电子图板来绘制齿轮泵的几何模型，通过边界型函数来定义齿轮的转动，另外需要启用动网格模型。

通过本实例的演示过程，读者将学习到：

- CAXA 电子图板绘制齿轮；
- 边界型函数的定义；
- 动网格模型设置；
- 动画记录；
- 流线的显示。

起始文件——参见附带光盘“Ch12\sl12-4.dwg”、“Ch12\sl12-4.sat”。

结果文件——参见附带光盘“Ch12\sl12-4.msh”、“Ch12\sl12-4.dbs”、“Ch12\sl12-4.jou”、“Ch12\sl12-4.trn”、“Ch12\sl12-4.cas”、“Ch12\sl12-4-0200.cas”、“Ch12\sl12-4-0200.dat”、“Ch12\sl12-4-0400.cas”、“Ch12\sl12-4-0400.dat”、“Ch12\sl12-4-0600.cas”、“Ch12\sl12-4-0600.dat”、“Ch12\sl12-4-0800.cas”、“Ch12\sl12-4-0800.dat”、“Ch12\sl12-4-1000.cas”、“Ch12\sl12-4-1000.dat”、“Ch12\sl12-4-1200.cas”、“Ch12\sl12-4-1200.dat”、“Ch12\sl12-4-1400.cas”、“Ch12\sl12-4-1400.dat”、“Ch12\sl12-4-1600.cas”、“Ch12\sl12-4-1600.dat”、“Ch12\sl12-4-1800.cas”、“Ch12\sl12-4-1800.dat”、“Ch12\sl12-4-2000.cas”、“Ch12\sl12-4-2000.dat”、“Ch12\sl12-4-2200.cas”、“Ch12\sl12-4-2200.dat”、“Ch12\sl12-4-2400.cas”、“Ch12\sl12-4-2400.dat”、“Ch12\sl12-4-2600.cas”、“Ch12\sl12-4-2600.dat”、“Ch12\sl12-4-2800.cas”、“Ch12\sl12-4-2800.dat”、“Ch12\sl12-4-3000.cas”、“Ch12\sl12-4-3000.dat”、“Ch12\left.txt”、“Ch12\right.txt”、“Ch12\pressure.mpeg”、“Ch12\pressure.gif”。

动画演示——参见附带光盘“Ch12\AVI\sl12-4.avi”。

二、模型建立

1. 启动 CAXA 电子图板机械版 2009 软件，可以看到其工具按钮位于工作界面的上方，从中找到高级绘图按钮组，如图 12-88 所示。

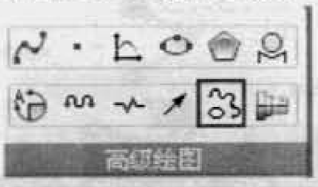


图12-88　高级绘图工具按钮

2. 单击其中画齿轮的按钮，弹出如图 12-89 所示的渐开线齿轮齿形参数对话框。在对话框中，输入本例齿轮的基本参数，输入好后单击[下一步(N) >]按钮，弹出如图 12-90 所示的预显对话框，在有效齿数中输入 10，单击[完成]按钮。这时就在视图窗口中出现了一个画好的浮动齿轮（位置尚未确定），将其拖动至原点处，使中点与原点重合，单击鼠标左键，即完成了一个齿轮的绘制。

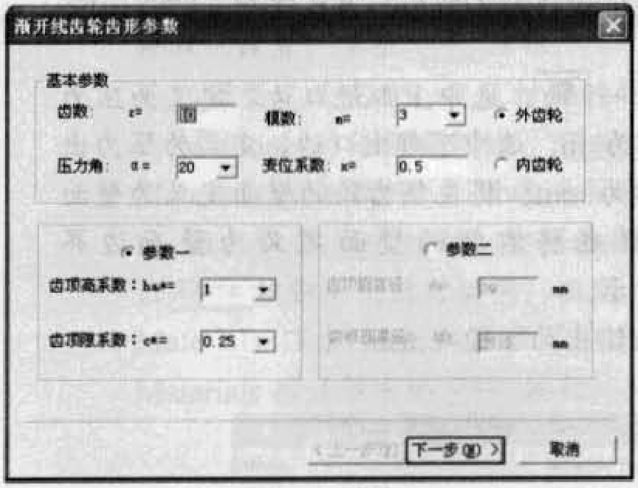


图12-89　参数设置

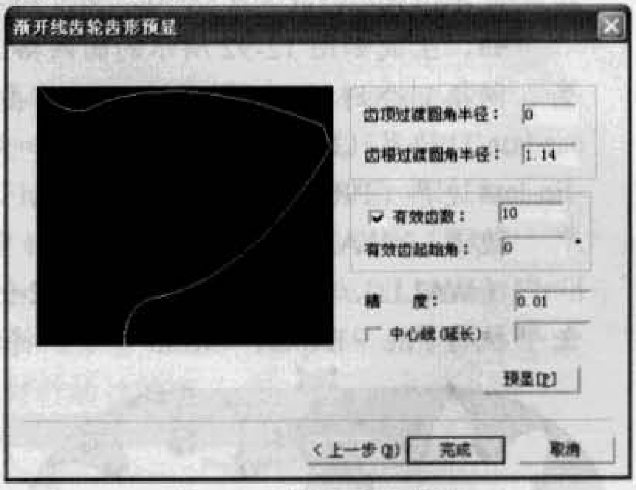


图12-90　齿轮有效齿数设置

3. 按同样的方法再绘制一个一样的齿轮。绘制完后将工程文件保存为 dwg 格式文件。
4. 启动 AutoCAD 2007，读入 sl12-4.dwg，按照图 12-87 所示的模型示意图，完成齿轮泵轮廓的其他绘制。具体的 CAD 操作，这里不再详述，读者可以查阅相关 CAD 书籍。
5. 绘制完成后，在命令面板中单击按钮，选择图形的所有轮廓线，单击鼠标右键或按 Enter 键，执行 File→Export 命令，选择保存类型为 ACIS（*.sat），输入 sl12-4.sat，再次选择图形的轮廓线，单击鼠标右键或按 Enter 键。将模型以面域形式输出，供 GAMBIT 调用。
6. 双击 GAMBIT 的桌面快捷方式，启动 GAMBIT。执行 File→Import→ACIS 命令，输入文件名 sl12-4.sat，即可将 CAD 中绘制的图形导入到 GAMBIT 中。
7. 此时的几何图形为 3 个面域，我们的计算区域为外围面域减去两个齿轮面域，故单击 Face 面板中的按钮，在 Subtract Real Faces 面板的第一行 Face 中选取外围面域，在第二行的 Faces 中选取两个齿轮面域，单击[Apply]按钮，得到本例的计算区域，如图 12-91 所示。

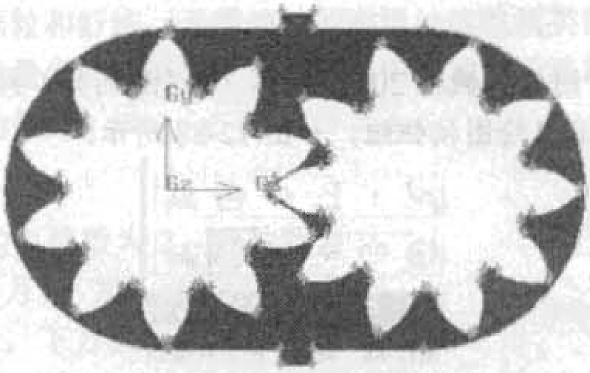


图12-91 绘制好的几何模型

三、网格划分

1. 模型绘制好后进行网格的划分。单击 → → ，打开 Mesh Faces 面板，选中本例的计算区域，以 Elements: Tri 和 Type: Pave 的网格划分方式，并采用 Interval size 为 0.2 划分面网格，保持其他默认设置，单击 Apply 按钮，生成如图 12-92 所示的面网格。
2. 网格划分好后定义边界类型。单击 → ，选中上部进口边，定义为压力入口边界（PRESSURE_INLET），名称为 in；选中下部出口边，定义为压力出口边界（PRESSURE_OUTLET），名称为 out；将左侧齿轮的壁面定义为壁面边界（WALL），名称为 w_l；同样也将右侧的壁面定义为壁面边界（WALL），名称为 w_r，如图 12-93 所示。
3. 执行 File→Export→Mesh 命令，将网格输出为 sl12-4.msh。

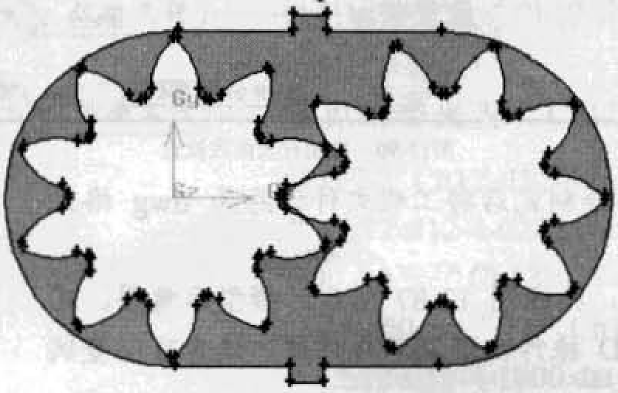


图12-92 面网格

Name	Type
in	PRESSURE_INLET
out	PRESSURE_OUTLET
w_l	WALL
w_r	WALL

图12-93 边界类型设置

四、求解计算

1. 启动 FLUENT 二维单精度计算器，执行 File→Read→Case...命令，读入划分好的网格文件“sl12-4.msh”。网格读入之后，执行 Grid→Check 命令，检查网格的信息，检测成功后会出现“Done”语句。
2. 本例需要改变模型的尺寸，执行 Grid→Scale...命令，弹出 Scale Grid 对话框，如图 12-94 所示，选择 Grid Was Created In 下拉列表中的 mm，单击 Scale 按钮，即将模型缩小为原来的 1/1000，此时的计算区域尺寸范围可从 Domain Extents 中看出。

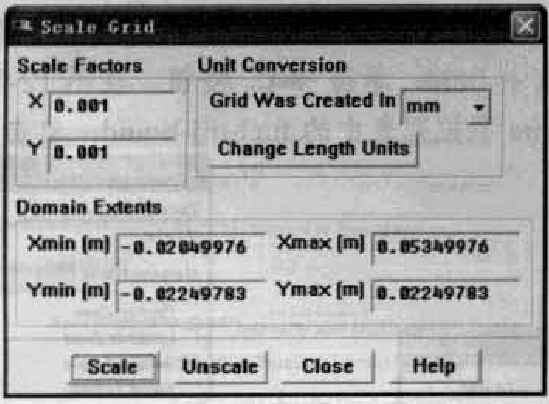


图12-94　尺寸定义

3. 下一步定义求解的基本模型。执行 Define→Models→Solver...命令，弹出 Solver 对话框，选择 Time 为 Unsteady，保持其他默认设置，单击 OK 按钮。
4. 执行 Define→Models→Viscous...命令，弹出 Viscous Model 对话框，在 Model 选项中选择 k-epsilon[2 eqn]，在 k-epsilon Model 选项下选择 Standard，保留其他默认设置，单击 OK 按钮。
5. 基本模型定义完后，定义材料的物性参数。执行 Define→Materials 命令，单击 Materials 对话框右侧的 Fluent Database... 按钮，在弹出的 Fluent Database Materials 对话框中，利用滚动条选择 Fluent Fluid Materials 列表中的 fuel-oil-liquid，单击 Copy 按钮，即将数据库中的材料——油都拷贝到当前工程中。单击 Close 按钮关闭该对话框。回到 Materials 对话框，即会发现在 Fluent Fluid Materials 下拉列表中存在了空气和油两种材料，如图 12-95 所示。单击 Materials 对话框中的 Close 按钮，完成材料物性的定义。

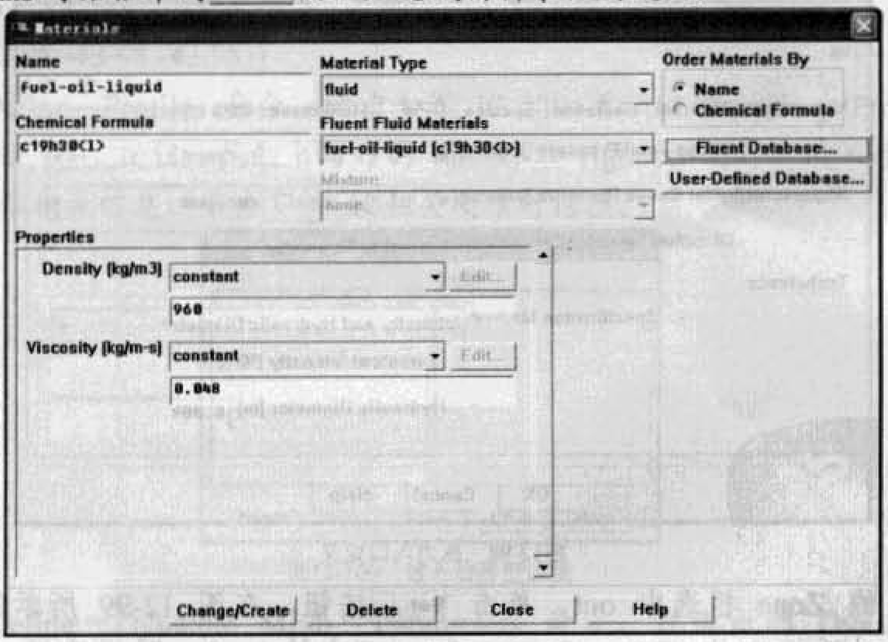


图12-95　材料油的定义

6. 执行 Define→Operating Conditions 命令，打开 Operating Conditions 对话框。如图 12-96 所示，在参考压强位置（Reference Pressure Location）X[m]中输入 0.0205，Y[m]中输入 0.025，单击 OK 按钮。
7. 接着定义边界条件。执行 Define→Boundary Conditions...命令，弹出 Boundary

Conditions 对话框，定义如下。

- 在左边的 Zone 栏选中 fluid，单击 Set... 按钮，在图 12-97 所示的 Fluid 对话框中选择 Material Name 下拉列表中的 fuel-oil-liquid，单击 OK 按钮。

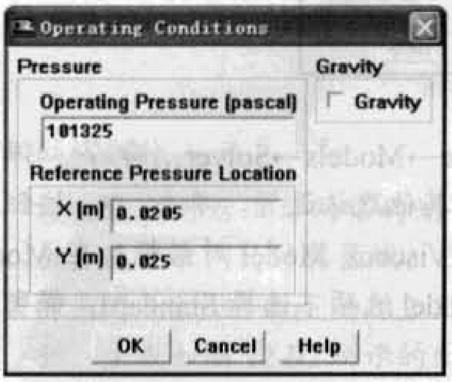


图12-96 操作环境设置

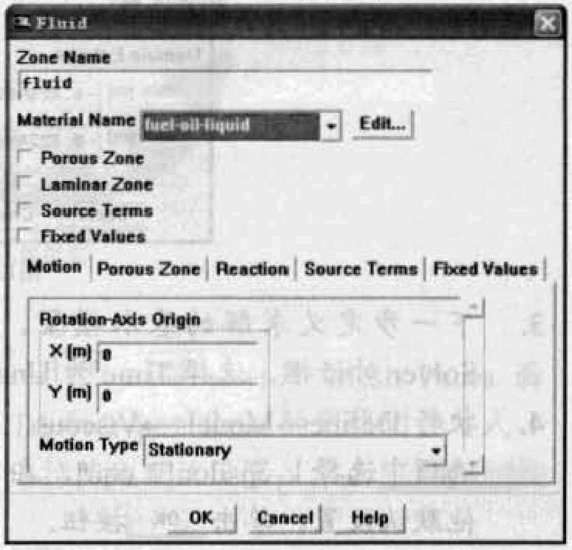


图12-97 流体介质定义

- 在左边的 Zone 栏选中 in，单击 Set... 按钮，在图 12-98 所示的 Pressure Inlet 对话框中的 Gauge Total Pressure[pascal]中输入 0，在 Supersonic/Intital Gauge Pressure[pascal]中输入 0，选择 Specification Method 下拉列表中的 Intensity and Hydraulic Diameter，在 Turbulent Intensity[%]中输入 5，在 Hydraulic Diameter[m]中输入 0.004，保持其他默认设置，单击 OK 按钮。

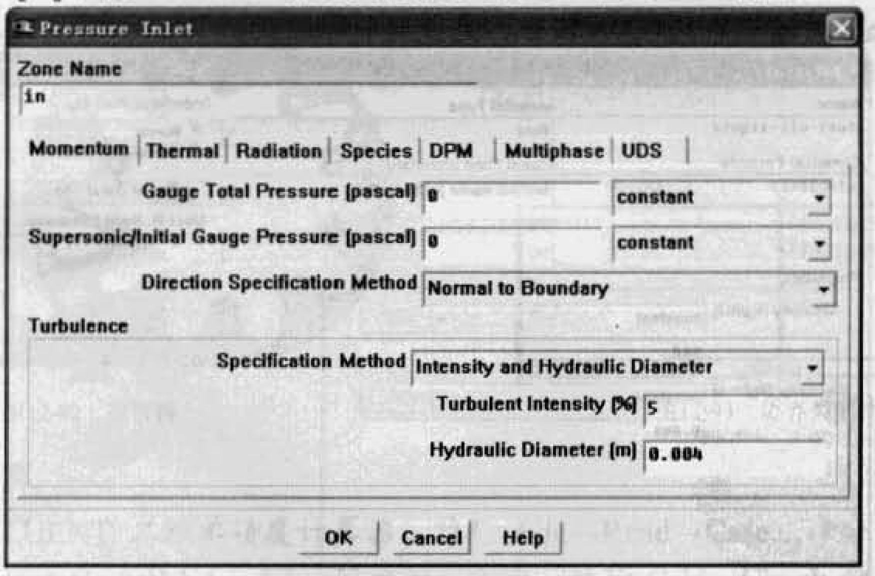


图12-98 压力入口定义

- 在左边的 Zone 栏选中 out，单击 Set... 按钮，在图 12-99 所示的 Pressure Outlet 对话框中的 Gauge Pressure[pascal]中输入 0，同样选择 pecification Method 下拉列表中的 Intensity and Hydraulic Diameter，在 Turbulent Intensity[%]中输入 5，在 Hydraulic Diameter [m]中输入 0.004，保持其他默认设置，单击 OK 按钮。

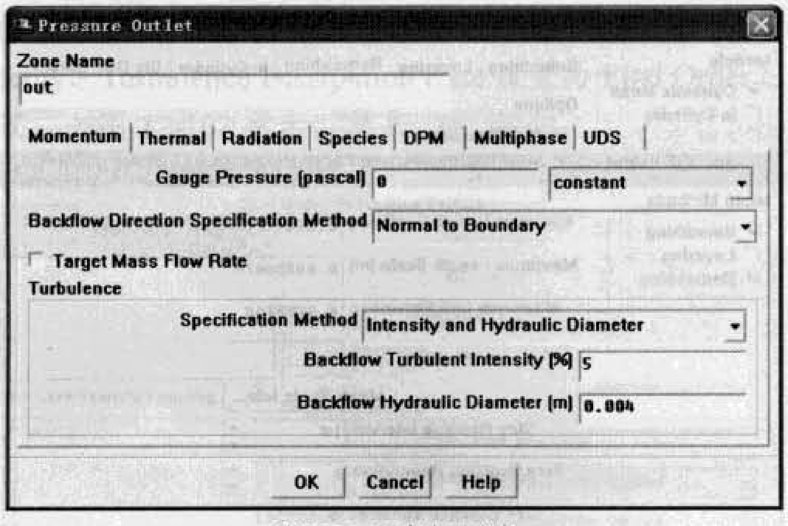


图12-99　压力出口定义

8. 在启用动网格模型之前，首先需要定义齿轮运动的边界型函数，打开两个空白记事本文件，分别输入如下两组函数，保存为 left.txt 和 right.txt 两个文件，并放置工作目录下。

左侧齿轮的边界型函数为：

((left 3 point)
(time 0 1 60)
(omega_z 43.98 43.98 43.98))

右侧齿轮的边界型函数为：

((right 3 point)
(time 0 1 60)
(omega_z -43.98 -43.98 -43.98))

9. 执行 Define→Profiles 命令，弹出如图 12-100 所示的 Boundary Profiles 对话框，单击 Read... 按钮，找到书写好的 left.txt 和 right.txt 文件，读入后对话框会自动显示相关信息，单击 Close 按钮关闭该对话框。

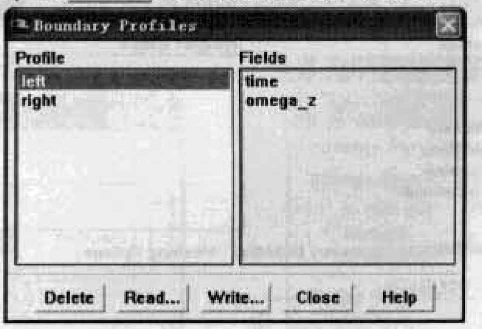


图12-100　读入边界型函数

10. 执行 Define→Dynamic Mesh→Parameters 命令，在弹出的 Dynamic Mesh Parameters 对话框中勾选 Dynamic Mesh 选项，对话框自动展开，如图 12-101 所示。选中 Mesh Methods 栏中的 Smoothing 和 Remeshing 选项，默认 Smoothing 选项卡的参数设置。在 Remeshing 选项卡的 Options 栏中选择 Size Function 和 Must Improve Skewness，其参数设置如图 12-101 所示，单击 OK 按钮。

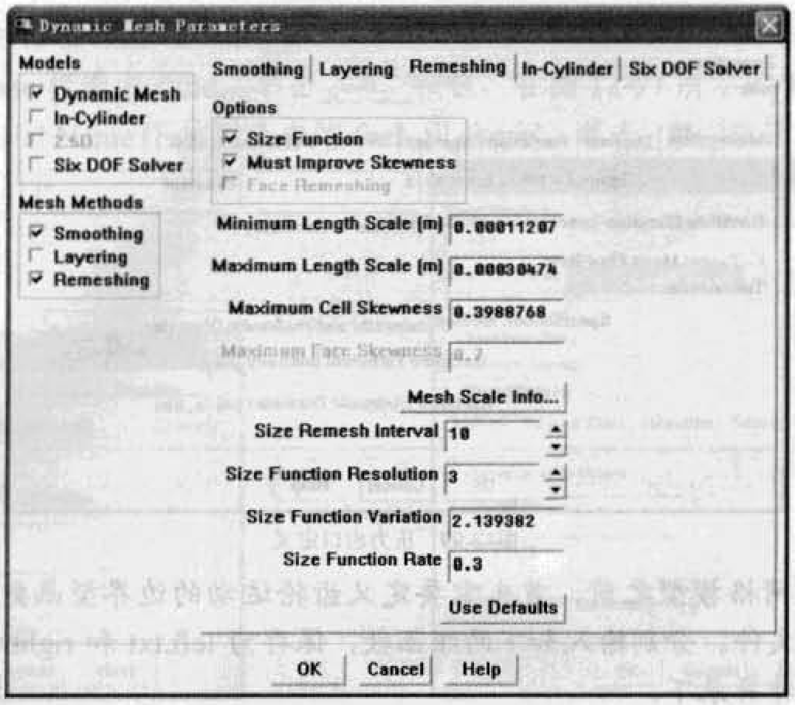


图12-101 动网格模型参数设置

11. 执行 Define→Dynamic Mesh→Zones 命令，设置边界型函数的使用对象，选择 Zone Names 中的 w_l，设置其类型 Type 为 Rigid Body（刚体运动），选择 Motion UDF/Profile 下拉列表中的 left（上步已经将其导入 FLUENT），保持 Motion Attributes 选项卡中的其他默认设置。选择 Meshing Options 选项卡，设置 Cell Height 为 0.0002（邻近网格的尺寸），单击 Create 按钮完成左侧齿轮的运动设置，如图 12-102 所示。同理，选择 Zone Names 中的 w_r，设置其类型 Type 也为 Rigid Body（刚体运动），选择 Motion UDF/Profile 下拉列表中的 right，在 Center of Gravity Location 的 x[m]中输入 0.033，并设置 Cell Height 也为 0.0002，单击 Create 按钮完成右侧齿轮的运动设置。最后单击 Close 按钮关闭 Dynamic Mesh Zones 对话框。

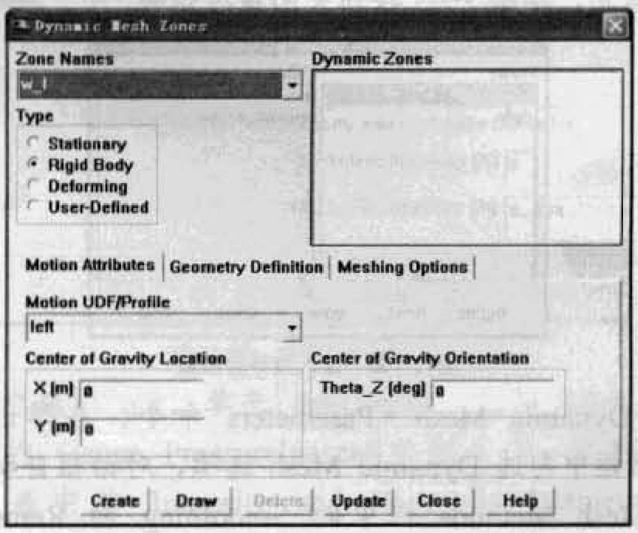


图12-102 移动边界设置

12. 动网格模型设置完后，执行 Solve→Control→Solution...命令，在 Solution Controls 对话框将 Pressure-Velocity Coupling 设置为 SIMPLE 格式，然后将

Discretization 项的 Pressure 设置为 PRESTO!，将 Momentum、Turbulence Kinetic Energy、Turbulence Dissipation Rate 设置为 First Order Upwind，保持其他默认设置，如图 12-103 所示，单击 OK 按钮。

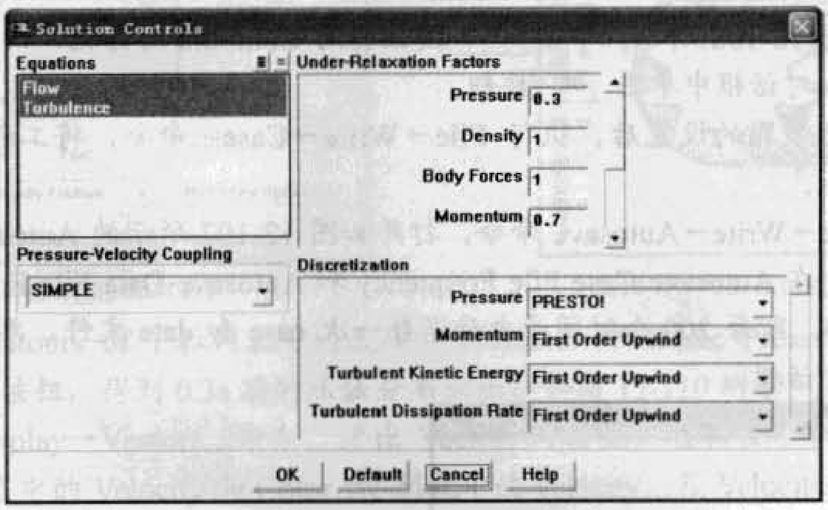


图12-103　求解控制参数设置

13. 接下来对流场进行初始化。执行 Solve→Initialize→Initialize...命令，在 Solution Initialization 对话框中选择 all-zones，对全区域初始化，顺序单击 Init、Apply、Close 按钮。
14. 初始化后，执行 Solve→Monitors→Residual...命令，在弹出的 Residual Monitors 对话框中选中 Plot，打开残差曲线图。对话框下方的 Criteria 中可以输入各参数的收敛精度要求，FLUENT 默认为 0.001，本例保持默认，单击 OK 按钮。
15. 下面设置本例的动画。执行 Solve→Animate→Define 命令，弹出 Solution Animation 对话框，通过右侧的箭头将数字从 0 调成 1。如图 12-104 所示，在 Name 中输入 pressure，将 When 选为 Time Step，设置 Every 为 50，即每一帧的录像时间为 50 个时间步。
16. 接着对动画进行详细设置。单击 pressure 行最右侧的 Define... 按钮，弹出如图 12-105 所示的 Animation Sequence 对话框。

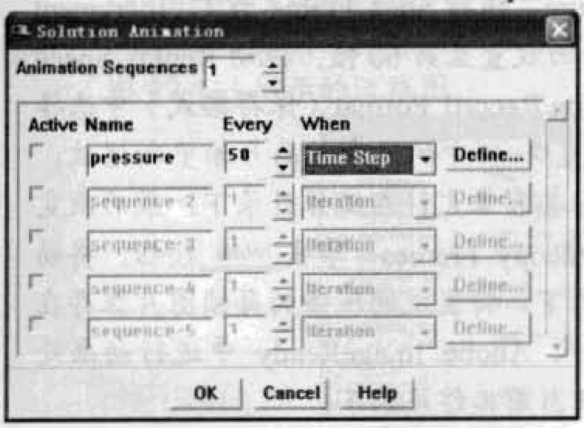


图12-104　动画个数设置

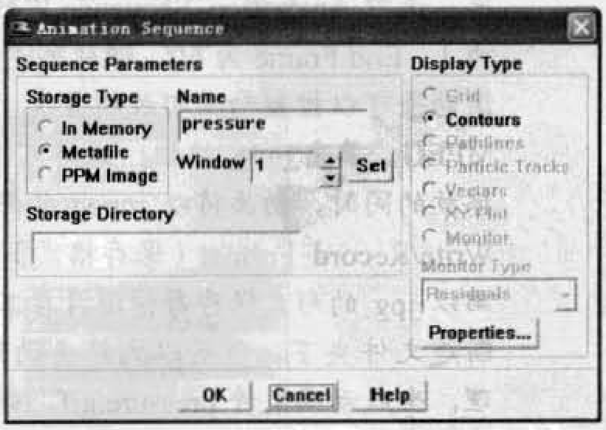


图12-105　动画详细设置

17. 选择对话框中的 Storage Type 为 Metafile，在 Window 中输入 1，通过单击右侧的 Set 按钮使对应的 id 窗口生效，此时会出现一个空白的图形窗口。然后选

择Display Type下方的Contours，这时自动弹出Contours对话框，选择对话框中Contours of下方的Pressure...和Static Pressure，并将Options栏中的Filled勾选，单击 Display 按钮后，刚才的空白窗口 1 中即出现了初始时刻的压强云图，如图12-106所示。单击 Close 按钮关闭Contours对话框，回到Animation Sequence对话框中单击 OK 按钮。

18. 完成上述步骤的设置后，执行 File→Write→Case...命令，将工程文件保存为sl12-4.cas。

19. 执行File→Write→Autosave命令，打开如图12-107所示的Autosave Cas/Data对话框，在Autosave Case File Frequency和Autosave Data File Frequency栏中输入200，即每200个时间步自动保存一次case和data文件，单击 OK 按钮关闭该对话框。

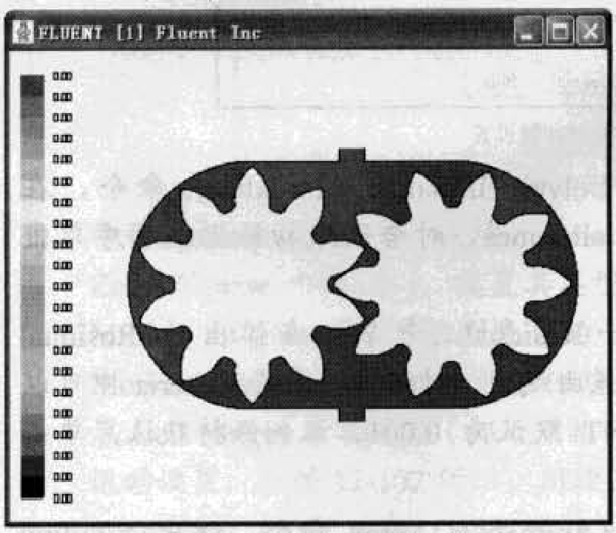


图12-106　压强初始时刻云图

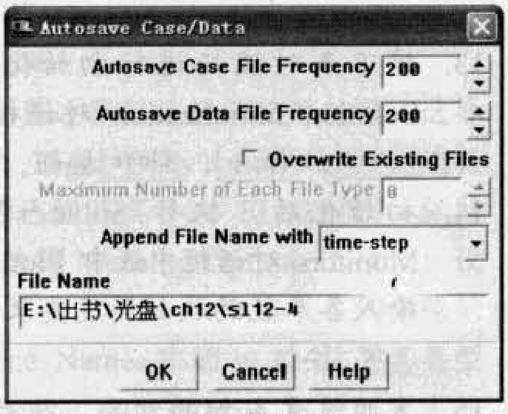


图12-107　自动保存设置

20. 执行Solve→Iterate...命令，设置时间步长为0.0001s，时间步为3000，并输入Max Iterations per TimeStep为60，单击 Iterate 按钮开始解算。计算结束后，执行 Solve→Animate→Playback 命令，打开如图12-108所示的动画回放对话框（Playback对话框），选择Playback Mode下拉列表中的Play Once，即回放一次。选中Animation Sequence中的pressure，保持Start Frame为1，Increment为1，End Frame为60，即从第1帧开始回放直至第60帧。拖动Replay Speed滚动条可以控制动画回放的速度。在Write/Record Format（保存格式）中选择MPEG，单击 Write 按钮。此时可以看到窗口 1 中的速度动画开始重新播放，播放的同时，动画将以mpeg的形式保存其影像文件在工作目录下。最后改变Write/Record Format（保存格式）为Hardcopy Frames，单击 Write 按钮，将动画以jpg的形式保存每帧图片在工作目录下。将生成的压强的每帧图片保存在新建文件夹下，然后以文件夹的形式导入Adobe ImageReady中进行动画处理，生成动画文件pressure.gif，并保存在当前工作目录下。

21. 执行Display→Contours...命令，在Contours对话框中选择Contours of下拉列表中的Velocity...和Velocity Magnitude，并选中Options栏中的Filled，单击 Display 按钮，得到0.3s后的速度分布云图，如图12-109所示。

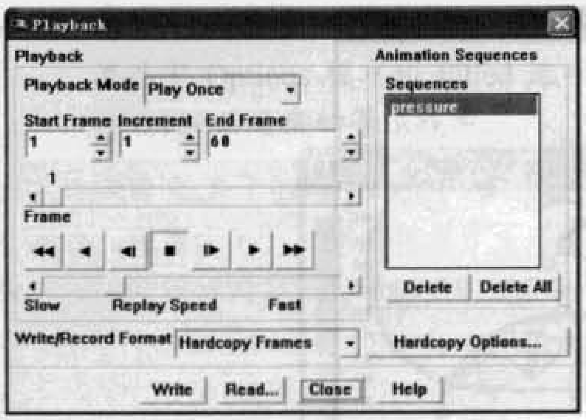


图12-108　动画回放对话框

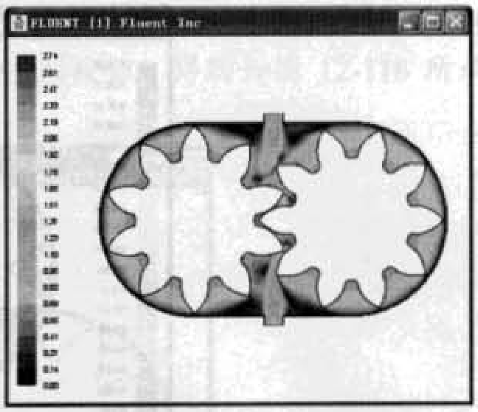


图12-109　0.3s 后的速度分布云图

22. 改变 Contours of 下拉列表中的选项为 Pressure...和 Static Pressure，再次单击 Display 按钮，得到 0.3s 后的压强分布云图，如图 12-110 所示。

23. 执行 Display→Vectors...命令，弹出 Vectors 对话框，选取该对话框 Vectors of 下方列表中的 Velocity 和 Color by 列表中的 velocity...及 Velocity Magnitude，将左侧的 Scale 改为 2，单击 Display 按钮，得到如图 12-111 所示的速度矢量图。

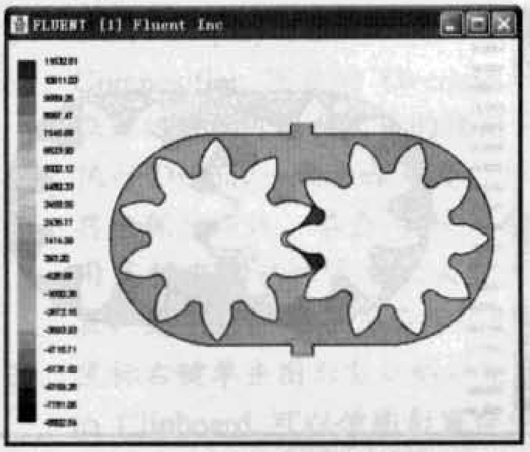


图12-110　0.3s 后的压强分布云图

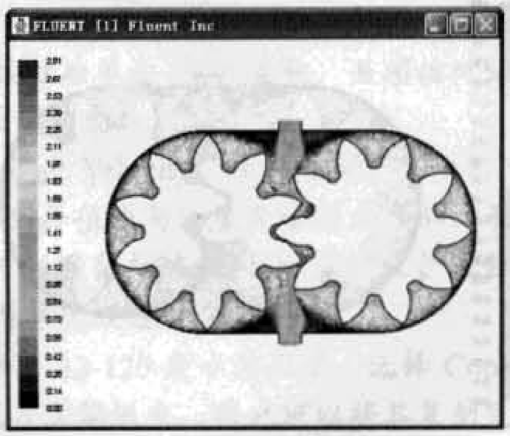


图12-111　0.3s 后的速度矢量图

24. 若想显示此时流线，执行 Display→Path Lines 命令，弹出如图 12-112 所示的 PathLines 对话框，选择 Release from Surfaces 中的 in、w_l 和 w_r，设置 Step Size[m]为 0.01，Steps 为 5000，Path Skip 为 2，单击 Display 按钮可以得到如图 12-113 所示的流线图。

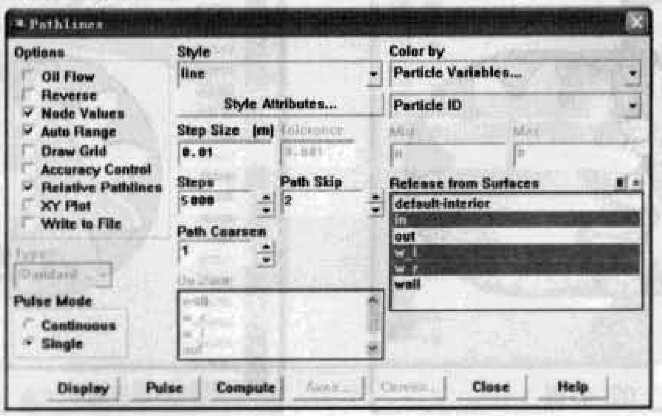


图12-112　Pathlines 对话框

典型工程实例　第 12 章

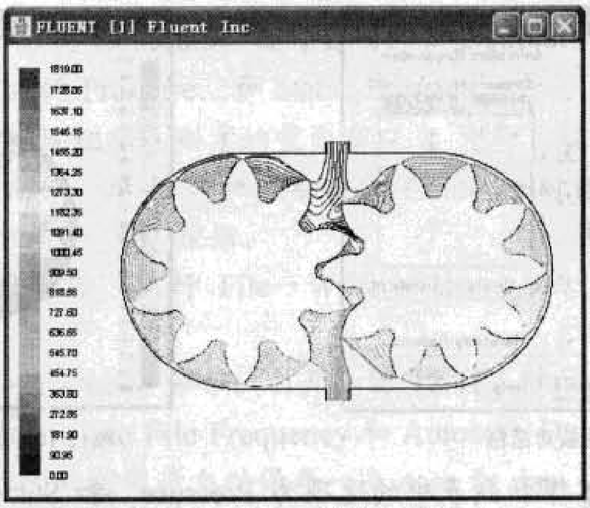


图12-113　0.3s 后的流线显示

25. 为分析不同时刻流场的变化，可以执行 File→Read→Case & Data...命令，读入“sl12-4-1000.cas”和“sl12-4-1000.dat”，同样利用 Display→Contours...命令，显示 0.1s 后的速度与压强云图，如图 12-114 和图 12-115 所示。

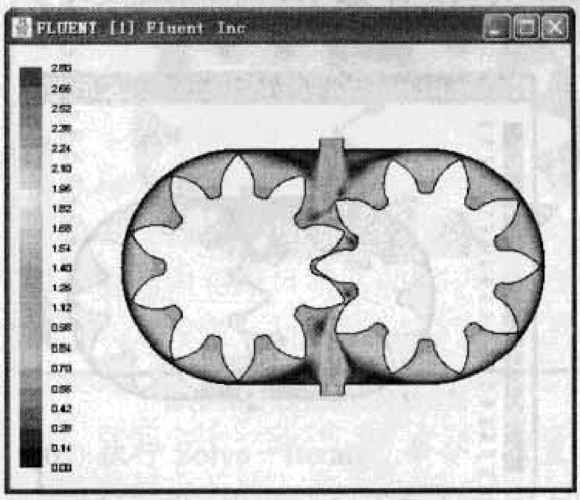


图12-114　0.1s 后的速度云图

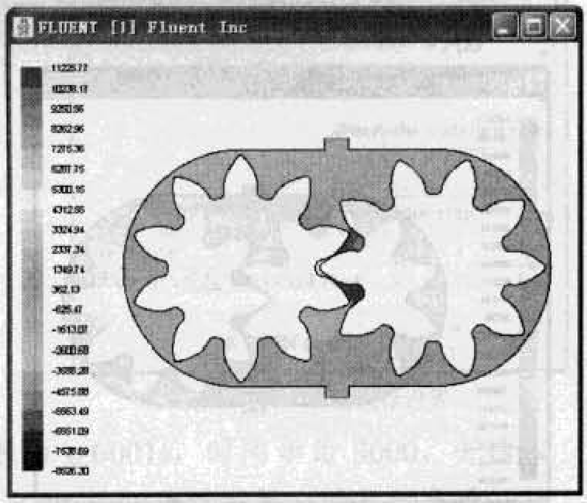


图12-115　0.1s 后的压强云图

26. 还可读入“sl12-4-1600.cas”和“sl12-4-1600.dat”，显示 0.16s 后的速度与压强云图，如图 12-116 和图 12-117 所示。

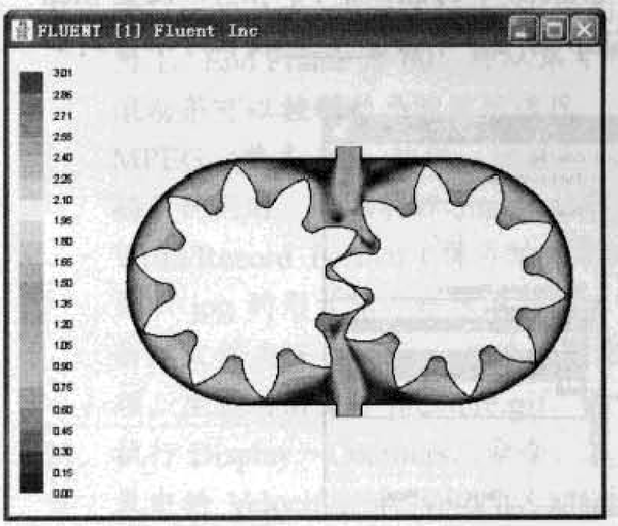


图12-116　0.16s 后的速度云图

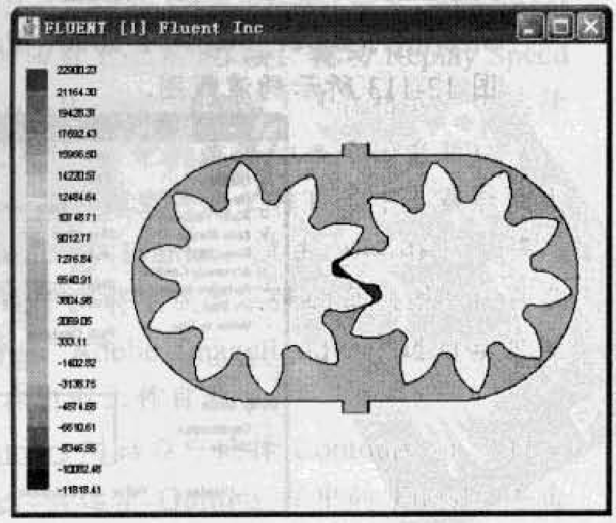


图12-117　0.16s 后的压强云图

27. 选择 Contours of 下拉列表中的选项为 Velocity...和 Velocity Magnitude，并取消选中 Options 栏中的 Filled 选项，单击 Display 按钮，得到如图 12-118 所示的 0.16s 后速度的等值线图。

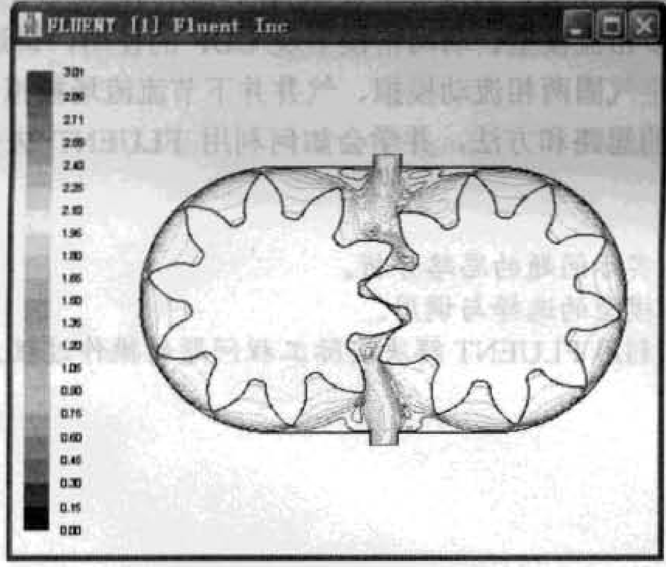


图12-118　0.16s 后的速度等值线图

28. 执行 Display→Scene 命令，弹出 Scene Description 对话框，勾选 Scene Composition 下方的 Overlays，单击 Apply 按钮后单击 Close 按钮，关闭该对话框。这样就可以在原来的视图窗口中进行图形的叠加。

29. 执行 Display→Vectors 命令，保持 Vectors of 为 Velocity，改变 Scale 改为 5，其余保持默认，单击 Apply 按钮，就可以看到等值线与速度矢量图的叠加。利用鼠标中键框取需要放大显示的区域，并利用鼠标左键移动图形至合适位置，图 12-119 所示为局部放大的速度矢量与等值线迭加图。

30. 鼠标右键单击图形窗口的标题栏，会弹出如图 12-120 所示的菜单，选择 Copy to Clipboard 可以使图形窗口中的视图保存在剪贴板中，用户可以将其复制到合适的文档中。

31. 完成图形的分析与输出，执行 File→Exit 命令，安全退出 FLUENT。

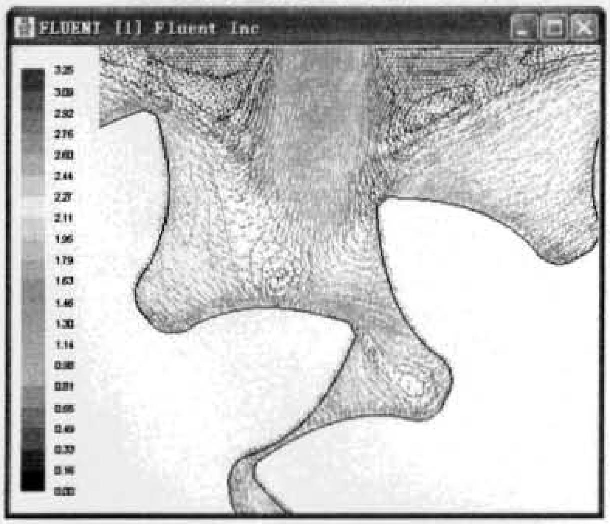


图12-119　0.16s 后局部放大的速度矢量与等值线迭加图

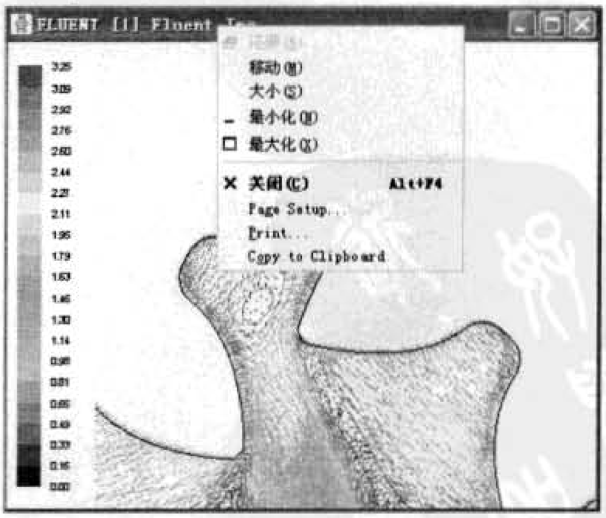


图12-120　拷贝图形文件

12.5 本章小结

本章结合石油天然气、环境、机械等工程领域的典型问题进行了 FLUENT 流体分析及仿真的介绍，主要针对多相流模型、动网格模型及 UDF 的使用，讲述了 T 型管内气液分离流动模拟、空气钻井环空气固两相流动模拟、气井井下节流流场模拟等 4 个实例，帮助读者掌握解决实际工程问题的思路和方法，并学会如何利用 FLUENT 去分析与解决实际问题，做到学有所用。

备忘录

- 实际问题的思路分析。
- 模型的选择与调用。
- 利用 FLUENT 解决实际工程问题的操作过程。

本书列举了利用FLUENT软件在石油工程、油气储运工程、机械工程、土木工程以及环境工程中所遇实际问题的解决方法，必将是工程运用及研究教学中很好的参考资料，尤其适用于石油工程、机械工程、流体力学领域的行业人员、科技工作者及在校学生。

西南石油大学油气田开发工程教授
西南石油大学石油工程学院副院长
四川省学术与技术带头人
核心期刊《石油钻采工艺》编委
核心期刊《油气藏地质与提高采收率》编委

FLUENT是CFD软件中相对成熟和运用非常广泛的商业软件，它的不断完善与更新，使得其不仅作为一个研究工具，而且还作为设计工具在水利工程、土木工程、石油工程、天然气工程、环境工程、食品工程、海洋结构工程等领域发挥着巨大的作用。本书必将成为各相关领域有价值的参考资料。

西南石油大学油气储运工程教授
国家自然基金委评审专家
教育部学位与研究生教育专家

本书针对钻井工程、采油工程、油气田地面工程、流体机械等各子领域面临的油气流体流动问题进行了数值仿真计算的详细介绍，同时重点阐述了数值计算的基本理论知识，使得读者能够在扎实的理论基础下灵活运用CFD技术解决实际问题。适合相关行业人员和在校学生使用。

黄坤
西南石油大学油气储运工程教授
西南石油大学油气储运教研室主任

本书把握住了CFD的研究方向，重点介绍了FLUENT在工程领域的应用，配备了实例源文件及动画教学文件，犹如面临授课，能够使读者较快地学会并使用FLUENT软件解决实际问题。本书是CFD领域很好的一本参考资料。

陈小榆
西南石油大学流体力学教授
西南石油大学流体热工教研室主任

ISBN 978-7-115-22526-9
ISBN 978-7-115-22526-9
定价：58.00元（附光盘）

分类建议：计算机／工程分析／FLUENT
人民邮电出版社网址：www.ptpress.com.cn

封面设计：任文杰